



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



**ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239**

**Aktivita 2:
Zkvalitnění vzdělávací činnosti a moderní výukové trendy**

**KEV – EST
Elektrické stroje**

Úvod

V tomto kurzu Elektrické stroje navážeme na znalosti z předchozích předmětů, především teoretické elektrotechniky. Budeme se zabývat základním popisem transformátorů, asynchronního a synchronního stroje a stroje stejnosměrného. Zmíníme se také o speciálních a moderních strojích.

Z těchto základních strojů se pak implementováním permanentních magnetů a napájením z výkonových měničů mohou odvodit další moderní stroje.

Tento text slouží jako základní informace pro studenty i netechnických oborů a bude na něj dále navazováno v dalším studiu.

1 Základní vztahy



Předpokládaný čas: 90 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o základních vztazích potřebných v oboru elektrických strojů
- Umět popsat zákon celkového proudu pomocí matematických vztahů *I* obrázkově
- Vědět, jak se liší magnetický tok v jádře a spřažený magnetický tok
- Umět vysvětlit Faradayův indukční zákon

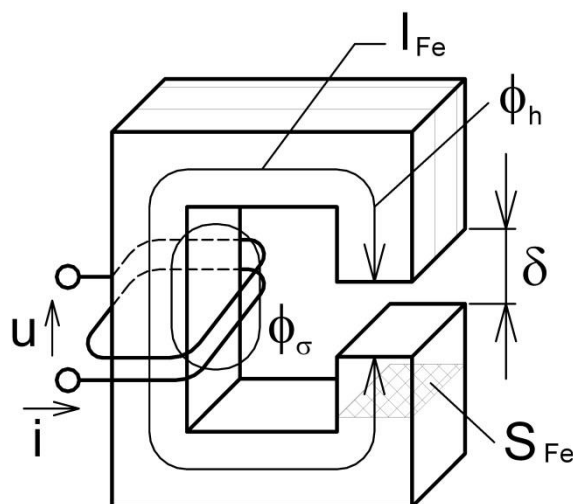
1.1 Zákon celkového proudu

Nejprve se podívejme na zopakování zákona celkového proudu. Z teoretické elektrotechniky známe jeho matematické vyjádření ve tvaru

$$H \cdot l = N I \sqrt{2} = U_m \quad (1.1)$$

kde je H ($A \cdot m^{-1}$) intenzita magnetického pole
 l (m) délka střední siločáry
 N (-) počet závitů cívky
 I (A) efektivní hodnota proudu v závitech
 U_m (A) amplituda magnetického napětí cívky

Pokud budeme uvažovat následující jednoduchý magnetický obvod



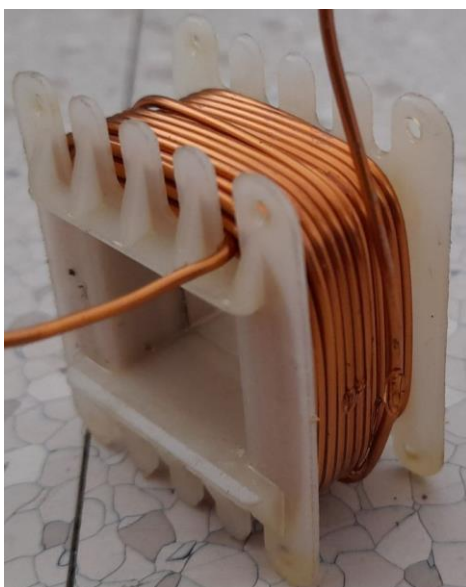
Obr. 1-1 Magnetický obvod s jednou vzduchovou mezerou.

lze tento vztah rozepsat pro oblast toku v magnetickém jádře a pro oblast magnetického toku ve vzduchové mezeře.

$$H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_0 \cdot \delta = N \cdot I = U_m \quad (1.1)$$

Příklad:

Máme za úkol vyrobit cívku, jejíž magnetické napětí je $U_m=100A$. K tomu lze přistoupit mnoha způsoby. Jako jedno „krajní“ řešení uvažujme cívku, která bude mít 100závitů a proud 1A. Druhým extrém můžeme reprezentovat cívku, která bude mít 1závit protékaný proudem 100A. Obě budou splňovat zadání, tj. $U_m=100A$, ale jejich konstrukční řešení bude diametrálně odlišné. První řešení připomíná cívku stykače nebo relé, druhé připomíná spíše trafopáječku.



Obr. 1-2 Cívka stykače a cívka s jediným závitem na velký proud (trafopáječka).

Dřívější jednotkou magnetického napětí byly $U_m(Az)$ – ampér – závit. Tato jednotka vystihovala výrazně zákon celkového proudu.

1.2 Spřažený tok se závitů cívky

Na schematickém obrázku magnetického obvodu byla cívka zakreslena se dvěma závitů, tj. $N=2(-)$. Tato cívka vytvoří magnetický tok např. 10 mWb. Tento tok se dělí na hlavní tok Φ_h a rozptylový tok Φ_σ .

Hlavní tok Φ_h (v našem případě např. $\Phi_h = 9$ mWb) prochází celým obvodem železného jádra a proto zabírá (= je spřažen) se všemi závitů cívky. Spřažený tok s cívku se označuje Ψ (Wb) a vypočítá se

$$\psi = N \cdot \phi \quad (1.2)$$

V našem případě po dosazení hodnoty hlavního toku

$$\psi = N \cdot \phi_h = 2 \cdot 9 = 18 \text{ mWb} \quad (1.3)$$

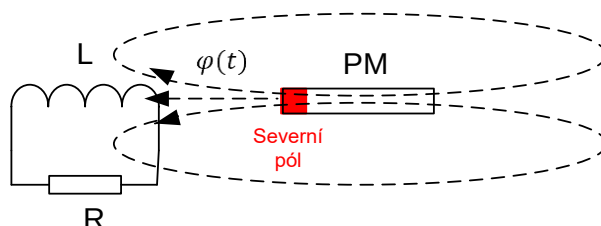
Rozptylový tok je sice vytvořen stejnou cívku, ale vlivem konečné magnetické vodivosti jádra neprochází celou délkou jádrem, nýbrž se uzavírá kratší cestou, často vzduchem nebo již přímo vinutím cívky. Nezabírá proto se všemi závitů cívky, která jej vybudila.

1.3 Faradayův indukční zákon

V roce 1831 Michael Faraday objevil indukční zákon. V uzavřeném elektrickém obvodu vznikne napětí a toto napětí vyvolá proud, pokud se tímto uzavřeným obvodem změní velikost protékajícího magnetického toku za určitý čas.

Matematicky to lze vyjádřit vztahem

$$u_i = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (1.4)$$



Obr. 1-3 Elektrický obvod s odporem a cívku, kterou protéká proměnný magnetický tok.

Pokud má cívka více než jeden závit, musíme uvažovat místo toku jádrem Φ spřažený tok Ψ , který je větší.

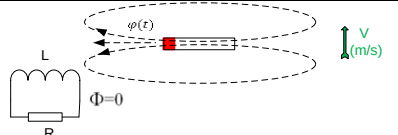
$$u_i = -N \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (1.5)$$

Příkladem může být nejjednodušší blikáčka na jízdní kolo. Odpor nahradíme LED diodou. Cívku použijeme z vhodného relé a obojí umístíme na vidlici kola. Paprsky výpletu opatříme permanentními magnety PM (např. těsnění z chladničky je osazeno permanentním magnetem, aby dvířka držela zavřená k plechovému krytu). Za jízdy se budou PM pohybovat kolem cívky a budou v ní indukovat napětí, které způsobí proud a bliknutí diody.

Pohyb magnetu PM kolem cívky rozdělíme do několika částí:

Tab. 1-1

ř.	Čas t (ms)	Mag. tok cívku $N \cdot \Phi$ (mWb)	Změna toku $d\Psi$ (mWb)	popis	Znázornění
1	0	0	-	PM je mimo cívku, tok cívku neprochází	
2	10	10	$\Psi_2 - \Psi_1 = 10$	PM je u cívky, tok cívku prochází	

3	20	0	$\Psi_3 - \Psi_2 = -10$	PM je mimo cívku, tok cívkou neprochází	
---	----	---	-------------------------	---	--

Dosazením do vztahu pro indukované napětí máme výsledek

$$u_i = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{0,01\text{Wb}}{0,01\text{s}} = 1\text{ (V)} \quad (1.6)$$

Nyní se zaměříme na otázku, jak by bylo možné indukované napětí zvýšit. Z matematického hlediska lze

1. zvýšit čítec zlomku
2. snížit jmenovatel zlomku

ad 1 - Zvýšení změn toku dosáhneme prakticky

- přiblížením magnetu k cívce, tj. zmenšením vzduchové mezery
- použitím silnějšího – kvalitnějšího magnetu
- zvýšením počtu závitů v cívce
- střídáním severního a jižního pólu magnetu, který je na straně u cívky

ad 2 – zkrácení doby mezi změnami toku dosáhneme prakticky

- zvýšením rychlosti jízdy, tj. zrychlením pohybu PM kolem cívky
- použitím magnetického obvodu v dutině cívky, tj. zhuštěním siločar¹

Otázky k tématu:

- Vypočítejte magnetické napětí cívky, která má 1000 závitů a prochází jí proud o efektivní hodnotě 1A.
- Kolik závitů musí mít cívka, jejíž magnetické napětí má velikost v amplitudě 100A a prochází jí efektivní proud $I=71\text{A}$?
- Jaký průběh bude mít indukované napětí v cívce, v které se změni od času $t_1=0,5\text{s}$ do času $t_2=1,5\text{s}$ sinusový spřažený tok z hodnoty $\Psi_1=+10\text{mWb}$ na tok $\Psi_2=-10\text{mWb}$?
- Jaká bude efektivní hodnota napětí v cívce z předchozího příkladu?
- Kolikrát bychom museli zvýšit počet závitů cívky, aby bylo napětí 3V?



Správné odpovědi

- Vypočítejte magnetické napětí cívky, která má 1000 závitů a prochází jí proud o efektivní hodnotě 1A.

¹ Ve skutečnosti kromě toho i zvyšujeme velikost toku cívkou od PM.

Magnetické napětí určíme ze vztahu

$$U_m = N I \sqrt{2} = 1000 \cdot 1 \cdot \sqrt{2} = 1414 \text{ A} \quad (1.7)$$

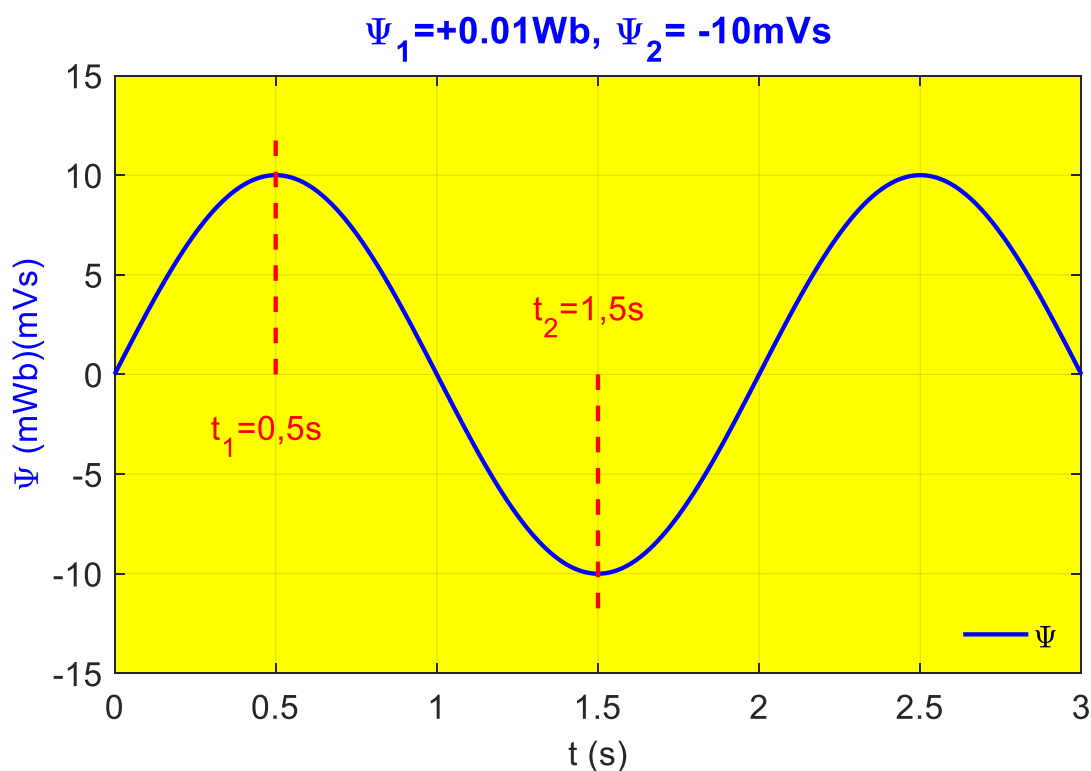
- Kolik závitů musí mít cívka, jejíž magnetické napětí má velikost v amplitudě 100A a prochází jí efektivní proud $I=71\text{A}$?

Počet závitů vyjádříme z výše použitého vztahu

$$N = \frac{U_m}{I \sqrt{2}} = \frac{100}{71 \sqrt{2}} = 1 (-) \quad (1.8)$$

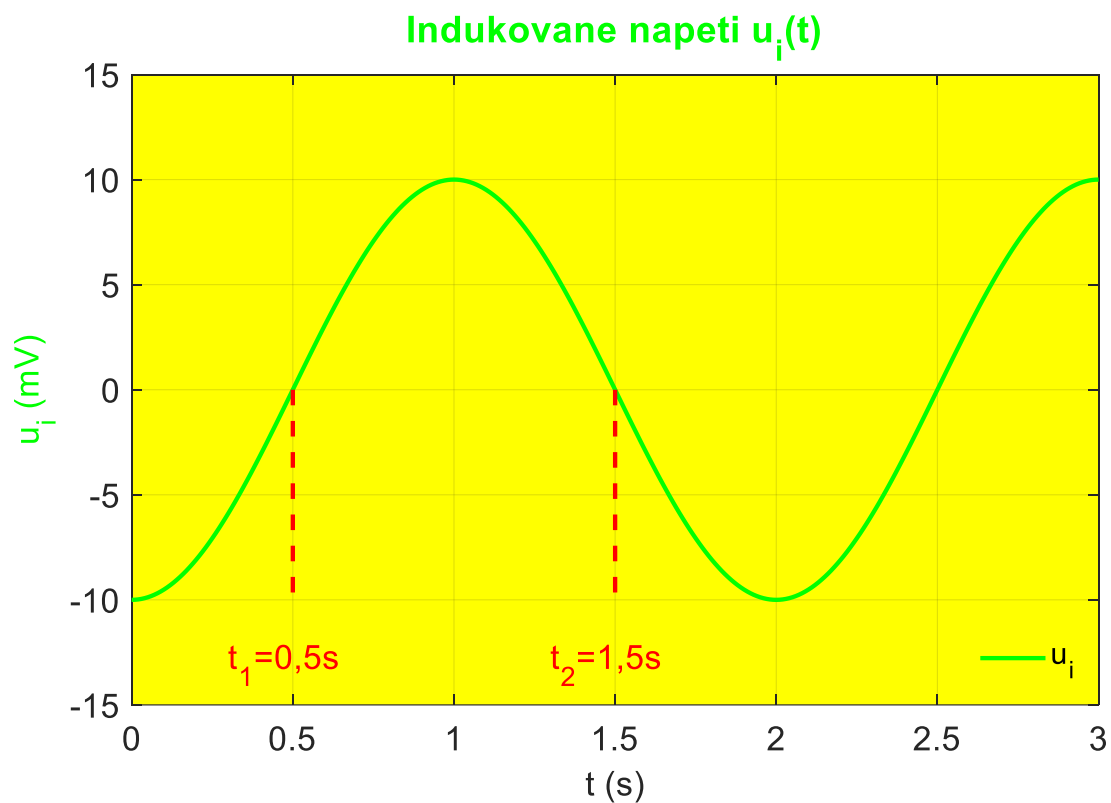
- Jaký průběh bude mít indukované napětí v cívce, v které se změni od času $t_1=0,5\text{s}$ do času $t_2=1,5\text{s}$ sinusový spřažený tok z hodnoty $\Psi_1=+10\text{mWb}$ na tok $\Psi_2=-10\text{mWb}$?

Spřažený tok v cívce má dle zadání následující průběh.



Obr. 1-4 Průběh spřaženého toku v cívce dle zadání.

Abychom získali průběh indukovaného napětí, musíme dle Faradayova indukčního zákona provést zápornou derivaci průběhu.



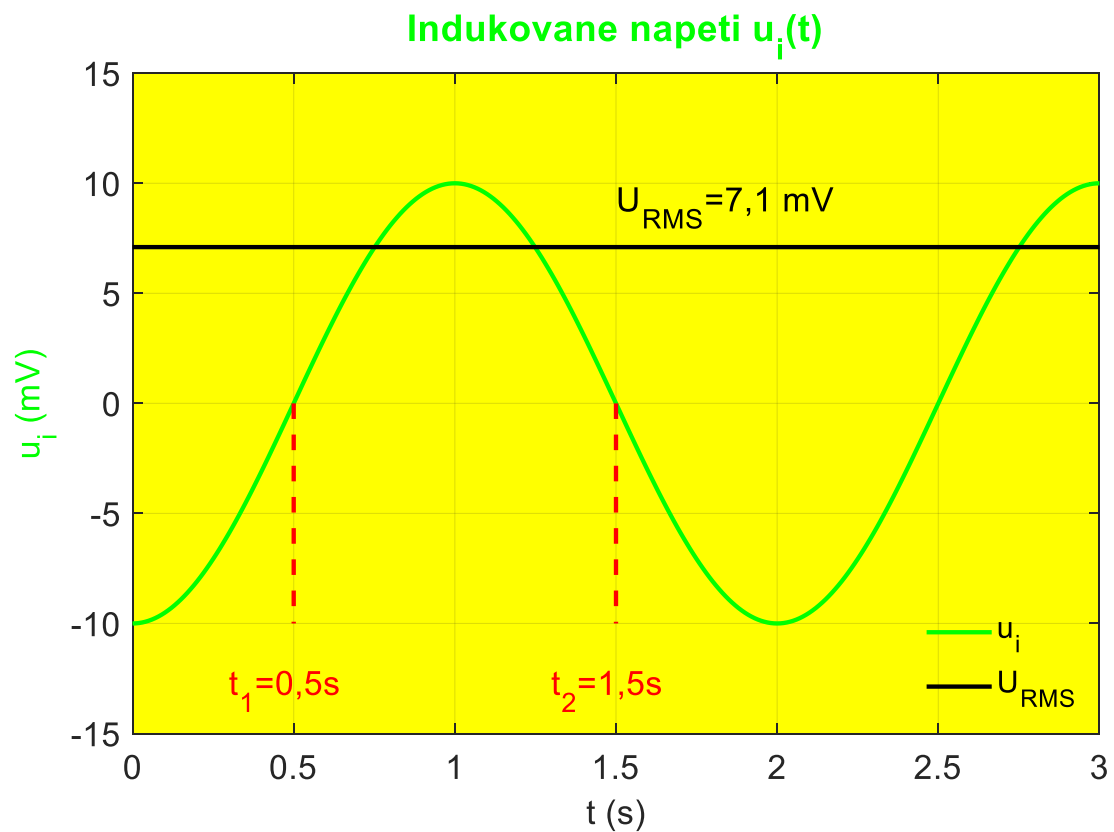
Obr. 1-5

Průběh indukovaného napětí v cívice.

- Jaká bude efektivní hodnota napětí v cívice z předchozího příkladu?

Použijeme amplitudu napětí a dosadíme do vztahu

$$U_{rms} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{0,01}{\sqrt{2}} = 7,1 \text{ mV} \quad (1.1)$$



Obr. 1-6

Efektivní hodnota napětí v cívkě.

- Kolikrát bychom museli zvýšit počet závitů cívky, aby bylo napětí 3V?

Museli bychom použít 424x více závitů.

2 Vznik transformátoru



Předpokládaný čas: 60 min

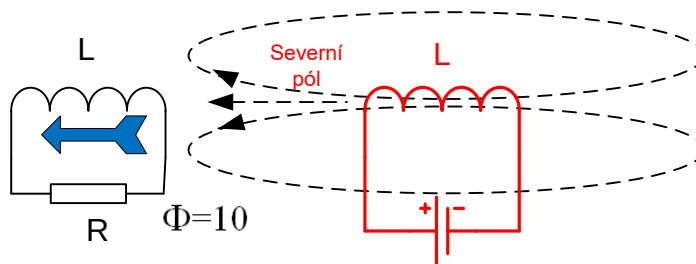


Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o Společném magnetickém toku dvou cívek
- Umět popsat vznik pohybového a transformačního indukovaného napětí
- Vědět, proč musí mít transformátor magnetické jádro a znát druhy jader 1f transformátorů
- Umět vysvětlit uspořádání cívek vinutí
- Znat toky v transformátoru
- Umět popsat vznik a velikost indukovaného napětí
- Umět vysvětlit převod transformátoru
- Umět vysvětlit náhradní schéma transformátoru
- Znat ztráty v transformátoru
- Vědět, jak lze upravit rozměry transformátoru

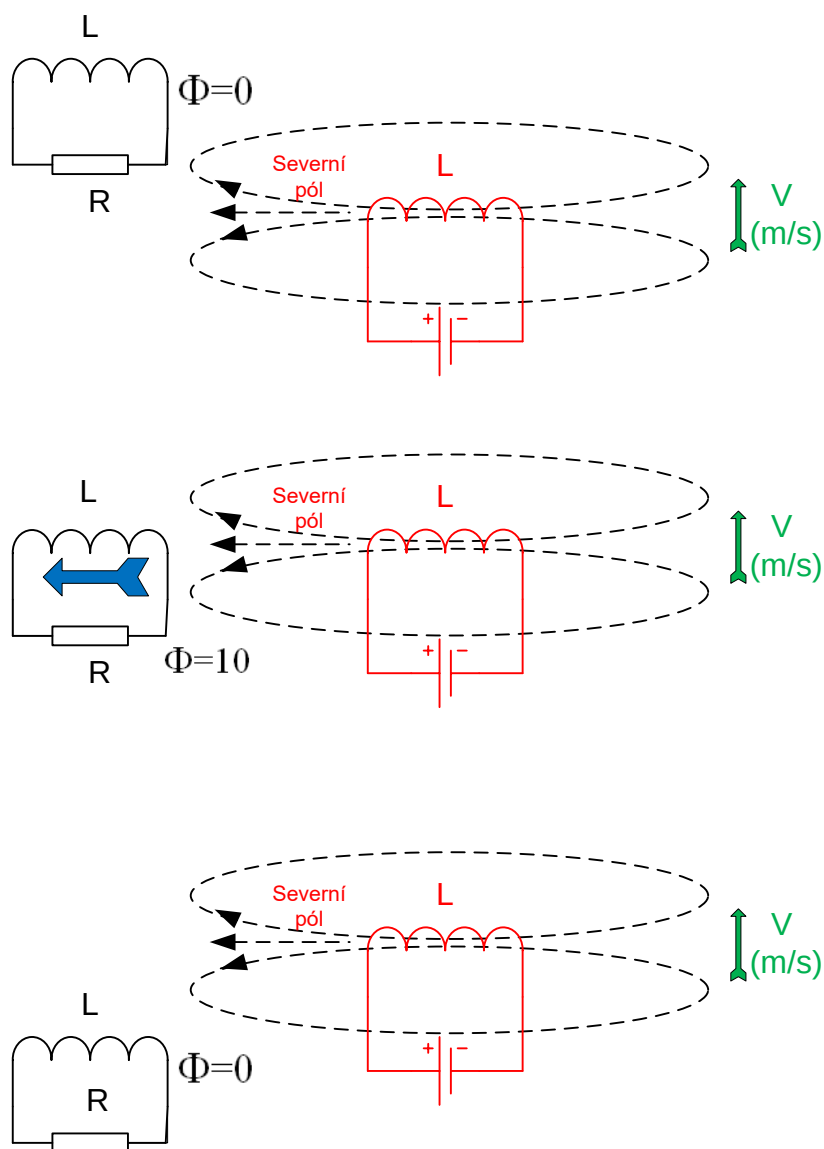
2.1 Dvě cívky se společným magnetickým tokem

V předchozí kapitole jsme popsali vznik indukovaného napětí v cívce, v které se měnil magnetický tok. Zdrojem tohoto toku byl pohybující se permanentní magnet (PM). Zdrojem toku však může být i jiná cívky, tj. elektromagnet.



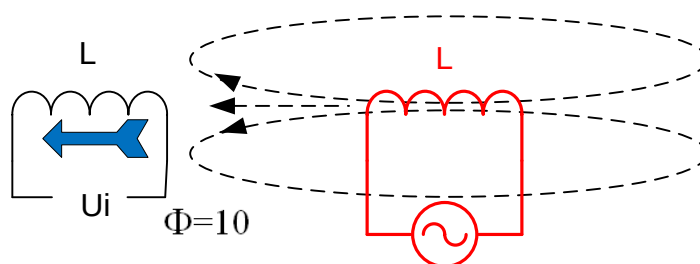
Obr. 2-1 Dvě cívky se společným magnetickým tokem.

Tyto dvě cívky mají určitou vzájemnou indukčnost. Pokud proto nahradíme PM elektromagnetem, který bude napájen stejnosměrným proudem a bude se pohybovat stejně jako v předchozím případě, bude se do první cívky indukovat napětí a LR obvodem bude procházet proud. Tomuto indukovanému napětí říkáme pohybové indukované napětí.



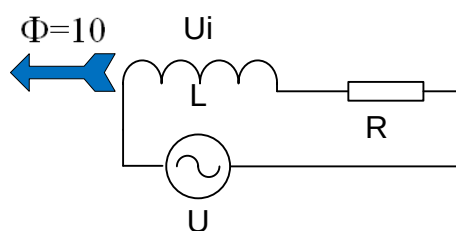
Obr. 2-2 Pohybující se cívka s DC proudem.

V první cívce bude totiž opět proměnný magnetický tok. Kdybychom ale napájeli druhou cívku střídavým napětím, bude v první cívce proměnný tok, i když se druhá cívka pohybovat nebude. Proto se bude v první cívce opět indukovat napětí, tentokrát ovšem transformační.



Obr. 2-3 Nepohybující se cívka s AC proudem. Stav nezatížené první cívky.

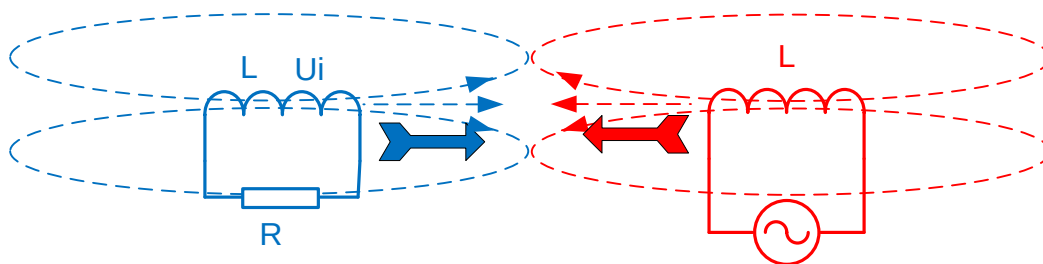
V cívce se bude indukovat napětí dokonce i v případě, že bude sama napájena střídavým napětím. Pak bude ona sama zdrojem proměnného magnetického toku a bude mít vnitřní indukované napětí.



Obr. 2-4 Nepohybující se cívka s AC proudem, která je napájena zdrojem AC napětí.

Vraťme se však k situaci, kdy máme dvě cívky. Jedna je napájena AC napětím a druhá má s ní společnou část magnetického toku a indukuje se v ní napětí. Podívejme se však detailněji na velikost tohoto napětí.

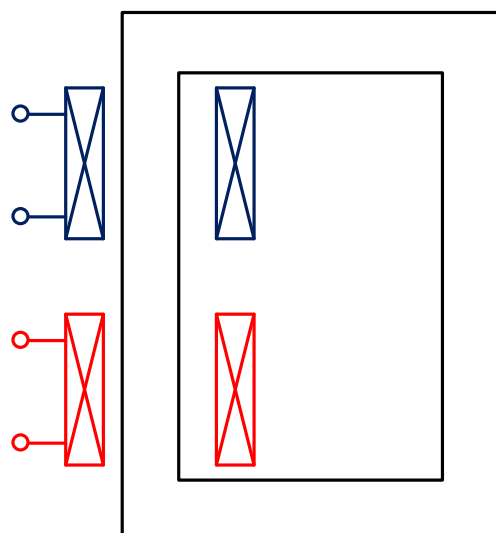
Pokud nyní druhou cívku s indukovaným napětím budeme chtít zatížit spotřebičem, vytvoří se ve druhé cívce také střídavý proud a ten vytvoří svůj magnetický tok. Tento druhý tok bude působit proti toku v první cívce a způsobí, že siločáry se zakříví a nebudou již procházet druhou cívkou v takovém množství, jako v případě cívky nezatížené. To se projeví značným poklesem indukovaného napětí.



Obr. 2-5 Nepohybující se cívka s AC proudem. Stav zatížené první cívky.

Abychom mohli první cívku zatěžovat a přesto v ní indukované napětí příliš nekleslo, musíme donutit tok, aby cívkou procházel, i když se v ní vlivem zátěže vytvoří „proti-tok“. To lze zajistit materiálem s dobrou magnetickou vodivostí pro magnetický tok a tím je železo.

Železo má totiž asi 10^4 x vyšší magnetickou vodivost než vzduch.



Obr. 2-6 Dvě cívky se společným magnetickým obvodem.

Toto uspořádání je základem pro vznik transformátoru.

2.2 Provedení 1f transformátorů

Nejprve se budeme věnovat provedení jednofázových transformátorů. Mohou být v zásadě konstrukce magnetického obvodu

- Toroidní
- Jádrové
- Plášťové

Podle toho se pak přizpůsobuje tvar a provedení cívek.

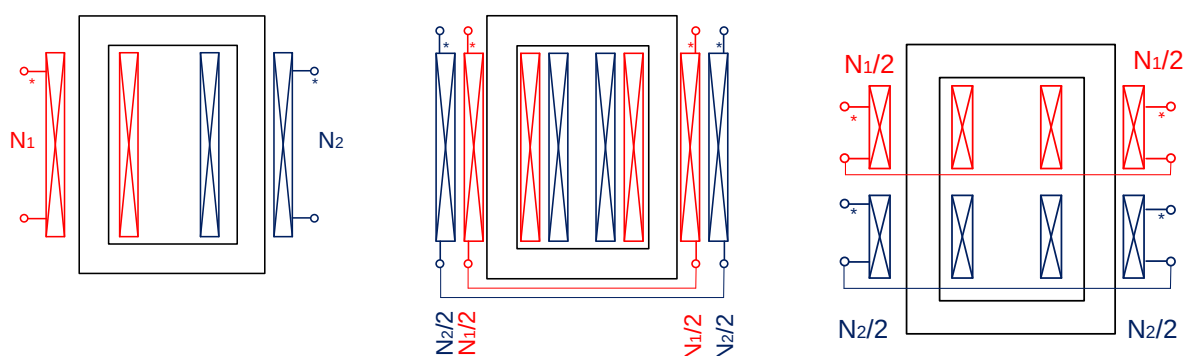


Obr. 2-7 Toroidní, jádrový a plášťový transformátor.

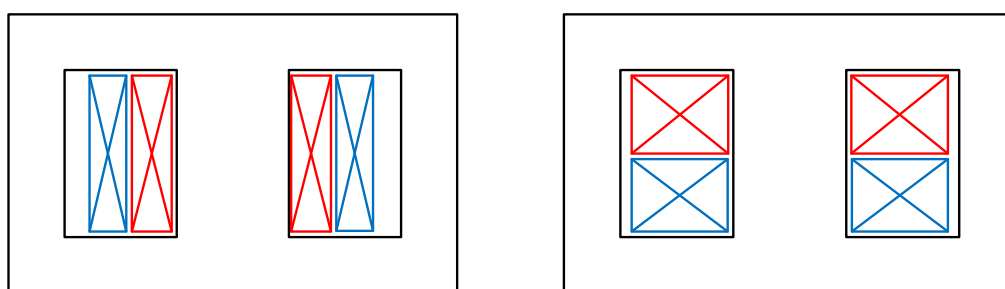
Jádrový transformátor může mít tzv. nedělené vinutí, tj. na každém jádře je jedna cívka. Taková konstrukce vinutí se používá pro svařovací transformátory nebo ve zdravotnictví pro napájení přístrojů, které musí mít kvalitní a spolehlivé galvanické oddělení pro bezpečnost pacientů.

Druhou možností je umístit polovinu závitů jedné cívky na obě jádra a stejně to udělat i pro druhou cívku. Tato konstrukce s děleným vinutím se používá pro transformátory, které mají být velmi tvrdým zdrojem napětí.

Plášťový transformátor může mít tzv. jednokomorovou kostru nebo dvojkomorovou kostru. Jednokomorová kostra zajišťuje opět tvrdé napětí, dvojkomorová kostra napětí měkčí.

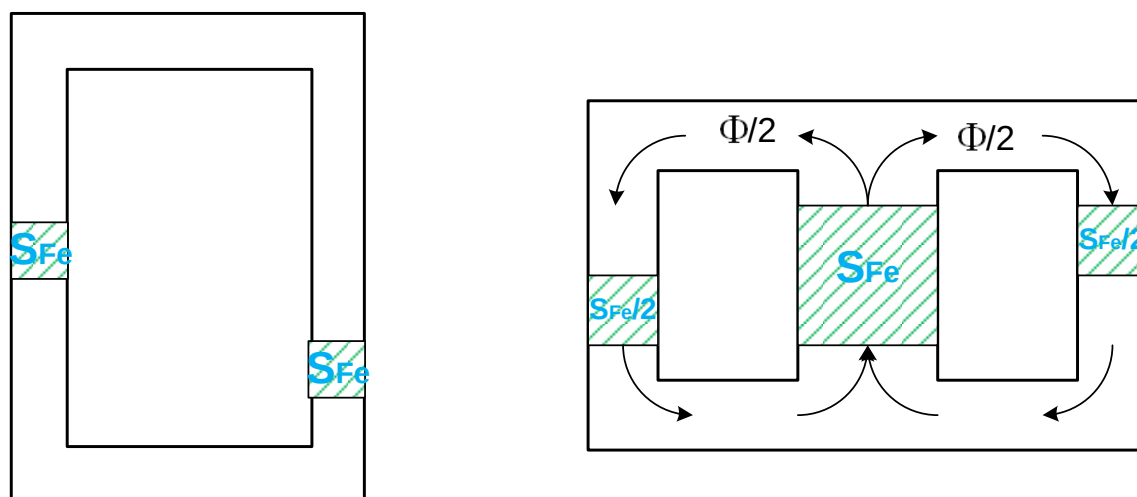


Obr. 2-8 Jádrový transformátor. Vinutí nedělené a vinutí dělené na poloviny.



Obr. 2-9 Plášťový transformátor. Jednokomorová a dvojkomorová kostra cívek.

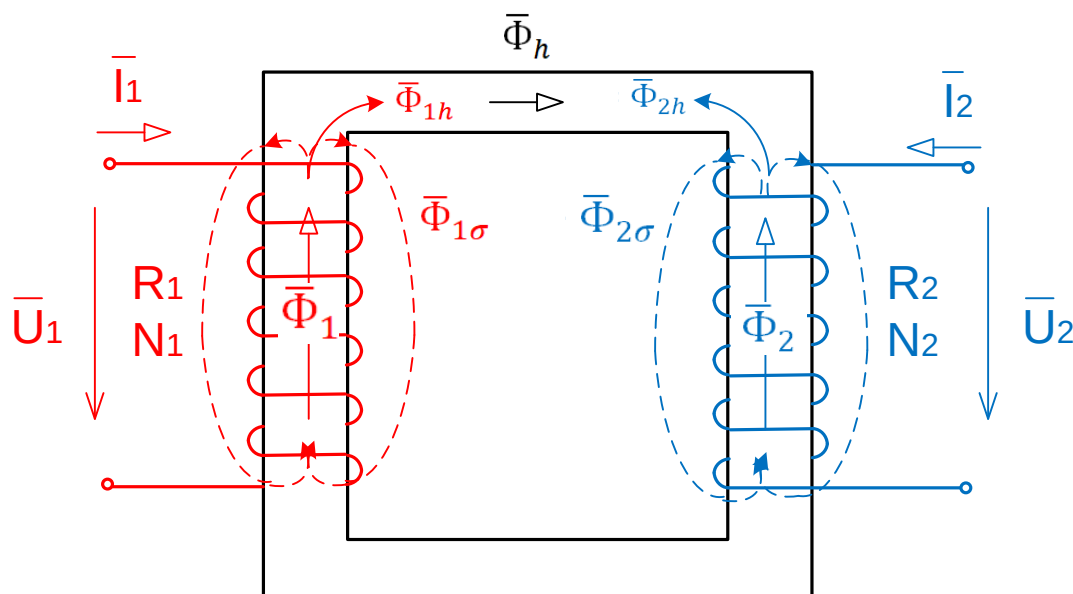
Průřez, tj. plocha jádra magnetického obvodu jádrového transformátor je všude stejná. U plášťového transformátoru mají krajní „pomocná“ jádra (tj. plášť) průřez poloviční. Důvodem je rozdělení toku vytvořeného cívkou na dvě poloviny.



Obr. 2-10 Jádrový transformátor a plášťový transformátor. Průřez magnetického obvodu.

2.3 Indukované napětí transformátoru

Princip činnosti transformátoru si ukážeme nejlépe na jádrové konstrukci.



Obr. 2-11 Jádrový transformátor a primární a sekundární vinutí.

Primární vinutí je napájené, budeme jej označovat indexy „1“. Sekundární vinutí je zatěžované spotřebičem, budeme jej označovat indexy „2“. Primární vinutí má N_1 závitů vodiče s odporem R_1 , sekundární vinutí má N_2 závitů vodiče s odporem R_2 .

Primární vinutí napájíme střídavým harmonickým napětím, v obrázku označeno fázorem $\bar{U}_1$. Pak bude primárním vinutím procházet proud $\bar{I}_1$ a v sekundárním vinutí se bude indukovat střídavé napětí $\bar{U}_2$ stejného kmitočtu jako je na primáru.

Magnetický tok vytvořený primární cívkou $\bar{\Phi}_1$ se rozdělí na dvě části:

- Tok jádrem $\bar{\Phi}_{1h}$, procházející též celým sekundárním vinutím. Tento tok je např. 99% toku $\bar{\Phi}_1$.
- Tok rozptylový $\bar{\Phi}_{1\sigma}$, který se uzavírá pouze rozptylovými cestami vzduchem a který sekundárním vinutím neprochází. Tento tok je např. Pouze 1% toku $\bar{\Phi}_1$.

Platí proto rovnice (pro nezatížené sekundární vinutí, tj. pro chod naprázdno)

$$\bar{\Phi}_1 = \bar{\Phi}_{1h} + \bar{\Phi}_{1\sigma} \quad (2.1)$$

Pokud zatížíme sekundární vinutí zátěží, začne i sekundárním vinutím procházet proud $\bar{I}_2$ a ten vytvoří svůj magnetický tok $\bar{\Phi}_2$.

Magnetický tok vytvořený sekundární cívkou $\bar{\Phi}_2$ se rozdělí také na dvě části:

- Tok jádrem $\bar{\Phi}_{2h}$, procházející též celým sekundárním vinutím a primárním vinutím. Tento tok je např. 99% toku $\bar{\Phi}_2$.
- Tok rozptylový $\bar{\Phi}_{2\sigma}$, který se uzavírá pouze rozptylovými cestami vzduchem a který sekundárním vinutím neprochází. Tento tok je např. Pouze 1% toku $\bar{\Phi}_2$.

Platí proto rovnice

$$\bar{\Phi}_2 = \bar{\Phi}_{2h} + \bar{\Phi}_{2\sigma} \quad (2.2)$$

Tyto rovnice slouží pro matematický popis chování transformátoru. V jádře je tok samozřejmě pouze jediný $\bar{\Phi}_h$ a ten je tvořen součtem obou toků

$$\bar{\Phi}_h = \bar{\Phi}_{1h} + \bar{\Phi}_{2h} \quad (2.3)$$

Toky $\bar{\Phi}_{1h}$ a $\bar{\Phi}_{2h}$ jsou prakticky v protifázi, takže je můžeme odečíst.



Obr. 2-12 Protifáze toků $\bar{\Phi}_{1h}$ a $\bar{\Phi}_{2h}$.

Pokud je střídavé napájecí napětí skutečně harmonické (tj. sinusové), vytvořený proud $\bar{I}_1$ je také sinusový. Protože proud vytvoří magnetický tok $\bar{\Phi}_1$, bude i tento tok sinusový. To lze matematicky popsat rovnicí

$$\bar{\Phi}_1 = \Phi_{1m} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.4)$$

Protože dle Faradayova zákona je indukované napětí derivací magnetického toku, musíme tento vztah derivovat. Protože z matematické analýzy víme, že

$$(\sin x)' = \cos x \quad (2.5)$$

Dostaneme derivováním toku $\bar{\Phi}_1$

$$u_{i1z} = -\frac{d\Phi_1}{dt} = \omega\Phi_{1m} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

To platí pro jeden závit cívky. Pokud bude mít cívka závitů obecně N , bude indukované napětí

$$u_i(t) = -\frac{d\psi_1}{dt} = -N \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = N\omega\Phi_{1m} \cdot \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

To je okamžitá hodnota indukovaného napětí.

V elektrických obvodech pracujeme častěji s efektivní hodnotou. Proto musíme amplitudu magnetického toku vydělit

$$U_i = N\omega \frac{\Phi_{1m}}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

Pokud rozepíšeme úhlový kmitočet

$$U_i = N \cdot 2\pi f \cdot \frac{\Phi_{1m}}{\sqrt{2}} \quad (2.9)$$

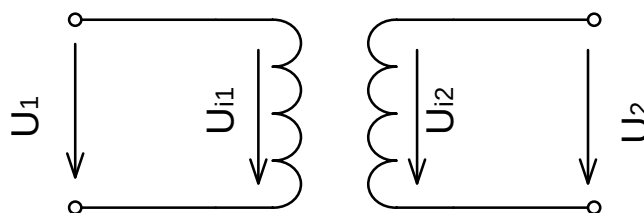
a konstanty sloučíme do jednoho čísla

$$U_i = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \Phi_{1m} f = 4,44 N \Phi_{1m} f \quad (2.10)$$

2.4 Převod transformátoru

Převod transformátoru je dán poměrem vnitřních indukovaných napětí.

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} (-) \quad (2.1)$$



Obr. 2-13 Indukovaná napětí pro určení převodu.

Ta jsou však prakticky nezměřitelná. Změřit lze pouze svorková napětí. Proto musíme zajistit, aby se vnitřní indukovaná napětí co nejvíce blížila svorkovým napětím, jinak řečeno, aby na podélných prvcích náhradního schéma byl co nejmenší úbytek napětí. To lze zajistit měřením

- v chodu naprázdno, kdy sekundární proud je $I_2=0$
- při značně sníženém napájecím napětí primáru, kdy je i primární proud velmi malý a vytvoří proto malý úbytek napětí

Po splnění těchto podmínek lze rovnici přepsat na tvar

$$k = \frac{U_{i1}}{U_{i2}} \approx \frac{U_1}{U_2} (-) \quad (2.2)$$

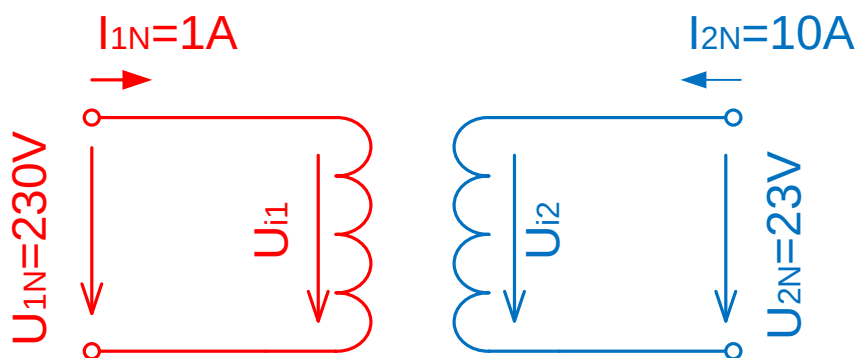
Poznamenejme zde, že se jedná o fázová napětí, přesněji řečeno o napětí přímo na vinutí. Proto záleží i na spojení transformátoru. Pokud je vinutí spojeno do

- Hvězdy, jedná se o napětí fázová
- Trojúhelníka, jedná se o napětí sdružená
- Lomené hvězdy, jde o napětí fázová
- Jednofázový transformátor, vinutí přímo svorkové, tj. fázové

Příklad:

Transformátor s primárním jmenovitým napětím $U_1=230V$ a sekundárním jmenovitým napětím $U_2=23V$ má převod

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{230}{23} = 10 (-) \quad (2.3)$$



Obr. 2-14 Parametry transformátoru s převodem $k=10(-)$.

Pokud je převod vyšší než jedna

$$k > 1 (-) \quad (2.4)$$

jedná se o transformátor snižovací, pokud je jeho převod vyšší než jedna

$$k > 1 (-) \quad (2.5)$$

jedná se o transformátor zvyšovací.

Pokud zanedbáme ztráty v transformátoru, pak musí platit rovnost vstupního (primárního) a výstupního (sekundárního) zdánlivého výkonu

$$S_1 = S_2 (VA) \quad (2.6)$$

U jednofázového transformátoru z předchozího příkladu můžeme rovnici rozepsat

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 (VA) \quad (2.7)$$

Pokud převedeme napětí na levou stranu a proudy na pravou stranu rovnice, obdržíme převod vyjádřený pomocí proudů

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k (-) \quad (2.8)$$

Převod můžeme vyjádřit i pomocí počtu závitů. K tomu dospějeme např. tímto postupem. Rovnici pro indukované napětí

$$U = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N \Phi_{1m} f = 4,44 N \Phi_{1m} f \quad (2.9)$$

napíšeme pro primární a sekundární hodnoty.

$$U_1 = 4,44N_1\Phi_{1m}f \quad (2.10)$$

$$U_2 = 4,44N_2\Phi_{2m}f \quad (2.11)$$

V obou rovnicích je však stejný kmitočet a dokonce i stejné toky

$$\Phi_{1m} = \Phi_{2m} \quad (2.12)$$

V jádře je totiž jen jediný výsledný tok. Proto jsou napětí úměrná počtu závitů

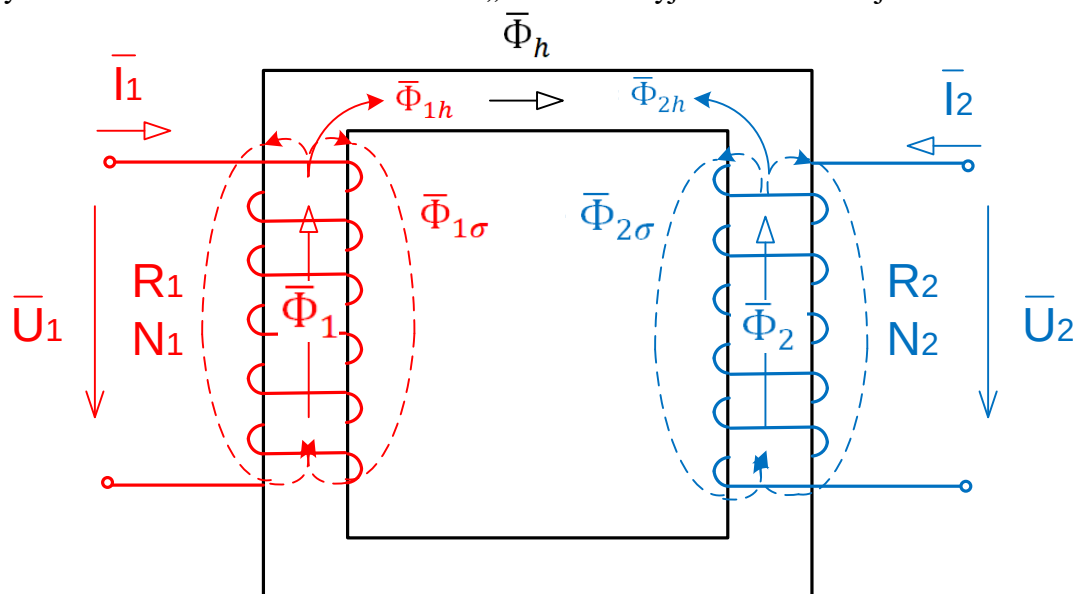
$$U_1 \approx N_1 \text{ a } U_2 \approx N_2 \quad (2.13)$$

Takže převod transformátoru lze vyjádřit také

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} (-) \quad (2.14)$$

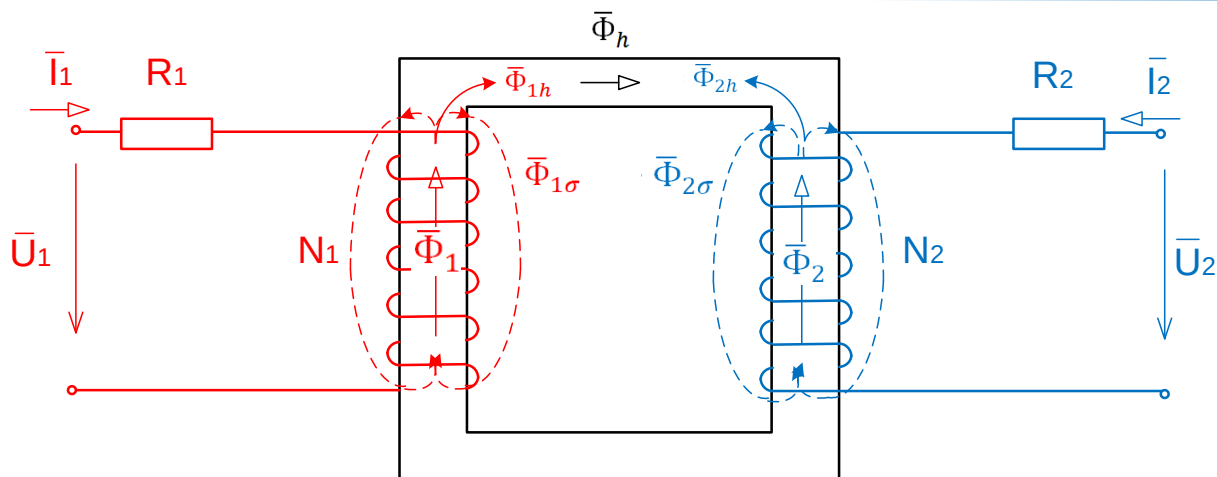
2.5 Náhradní schéma transformátoru – intuitivní přístup

Pro vytvoření náhradního schéma ve tvaru „T-članku“ vyjdeme z následujícího obrázku.



Obr. 2-15 Jádrový transformátor a primární a sekundární vinutí.

Abychom mohli považovat cívky za bezodporové a současně jsme nezměnili vlastnosti primárního ani sekundárního obvodu, vnitřní odpor vinutí položíme roven nule a současně do série zapojíme vně stejně velký odpor externí.

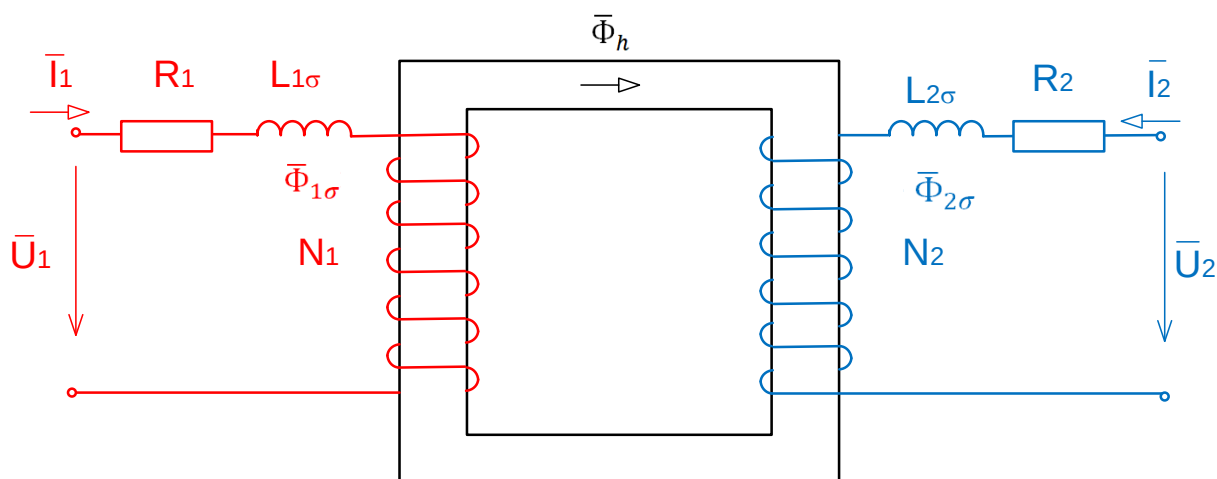


Obr. 2-16 Jádrový transformátor, který má primární a sekundární vinutí bezodporové.

Nyní provedeme obdobnou úvahu i pro rozptylové toky. Rozptylové toky primární cívky totiž nezabírají s cívkou sekundární a naopak rozptylové toky sekundární cívky nezabírají s cívkou primární.

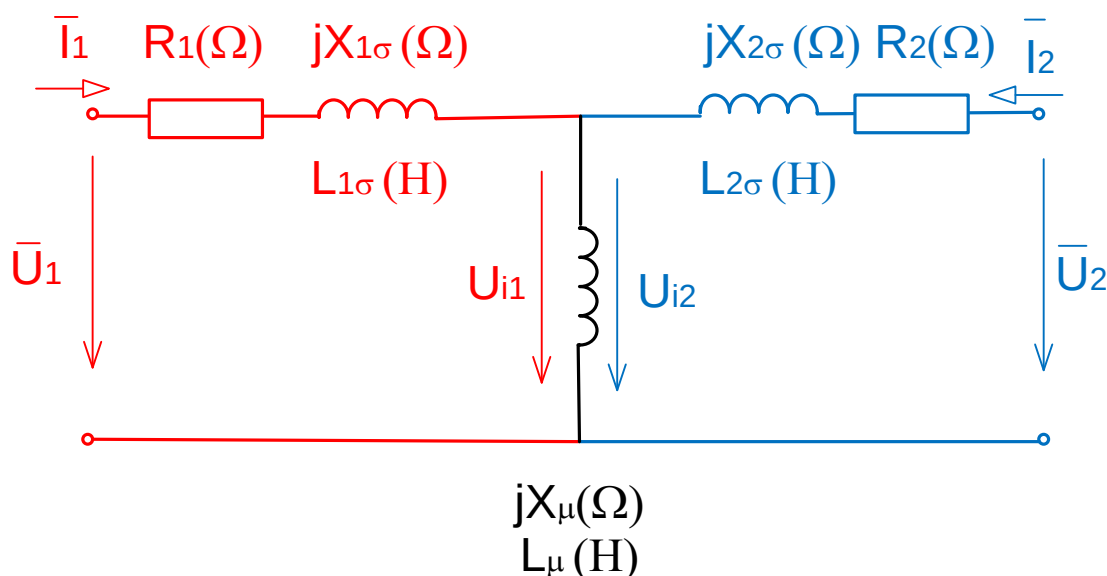
Pokud proto potřebujeme primární cívku považovat za ideální – bezrozptylovou – musíme zapojit sériově do obvodu externí cívku, jejíž indukčnost bude stejná jako je rozptylová indukčnost primárního vinutí.

Obdobně i sekundární cívku chceme považovat za ideální – bezrozptylovou. Proto musíme zapojit sériově do obvodu externí cívku, jejíž indukčnost bude stejná jako je rozptylová indukčnost sekundárního vinutí.



Obr. 2-17 Jádrový transformátor, který má primární a sekundární vinutí bezrozptylové.

Pokud jsou nyní primární i sekundární cívka ideální bezodporové a bezrozptylové (tj. zabírají se stejným tokem), můžeme je nahradit jedinou cívkou, protože jsou obě stejné a mají stejnou indukčnost.



Obr. 2-18 Jádrový transformátor, který má primární a sekundární vinutí nahrazeno jedinou (společnou) cívkou.

Toto schéma však má dvě nevýhody:

- Vzniklo galvanické propojení primárního a sekundárního vinutí, které v reálném transformátoru není. Reálný Tr galvanicky primární a sekundární obvod odděluje. Tuto nevýhodu musíme mít na zřeteli, pokud náhradní schéma používáme.
- Platí pouze pro oddělovací transformátory s převodem 1:1, tj. $k=1$.

Potřebujeme však, aby náhradní schéma transformátoru platilo pro transformátory s libovolným převodem. Proto abychom převod do náhradního schéma zavedli zpět, tak budeme na sekundárním vinutí uvažovat napětí fiktivní U'_2 a nikoliv fyzicky změřitelné reálné napětí U_2 . Vztah mezi fiktivním napětím a reálným napětím je

$$U'_2 = k \cdot U_2 \quad (2.15)$$

Tomuto fiktivnímu napětí říkáme napětí sekundární přepočtené na stranu primární. Podobně budeme používat i přepočítaný proud

$$I'_2 = \frac{I_2}{k} \quad (2.16)$$

a také sekundární parametry vinutí, tj. odpor sekundárního vinutí přepočítaný na stranu primární

$$R'_2 = k^2 R_2 \quad (2.17)$$

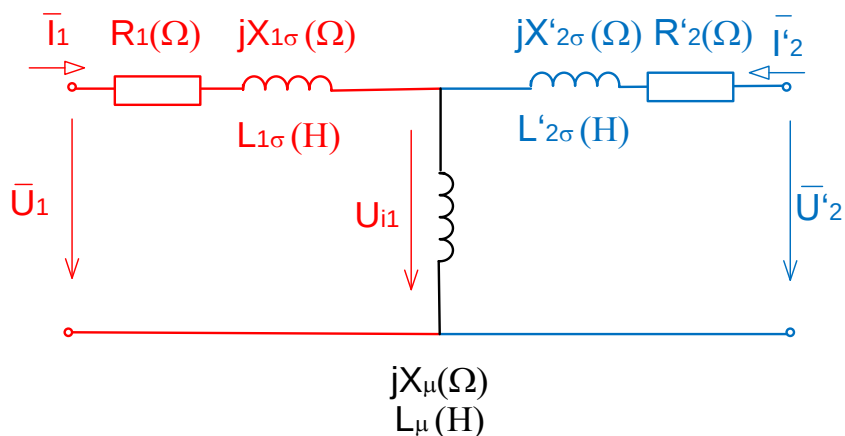
a rozptylovou reaktanci

$$jX'_{2\sigma} = k^2 jX_{2\sigma} \quad (2.18)$$

Na předchozím číselném příkladu vidíme, že sekundární napětí přepočítané na stranu primární je stejné jako primární napětí

$$U'_2 = k \cdot U_2 = 10 \cdot 23 = 230 = U_1 \quad (2.19)$$

Proto lze vnitřní indukované napětí psát pouze ze strany primární.

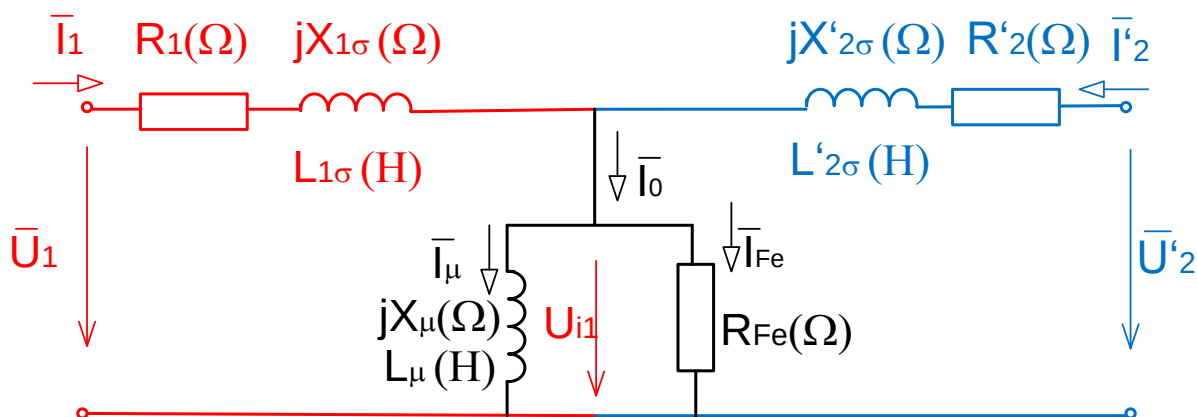


Obr. 2-19 Náhradní schéma transformátoru.

Toto náhradní schéma platí pro:

- jakýkoliv převod
- harmonické napájení
- jednu fázi (i u vícefázových transformátorů)
- symetrické zatížení vícefázových transformátorů
- ustálené stavy

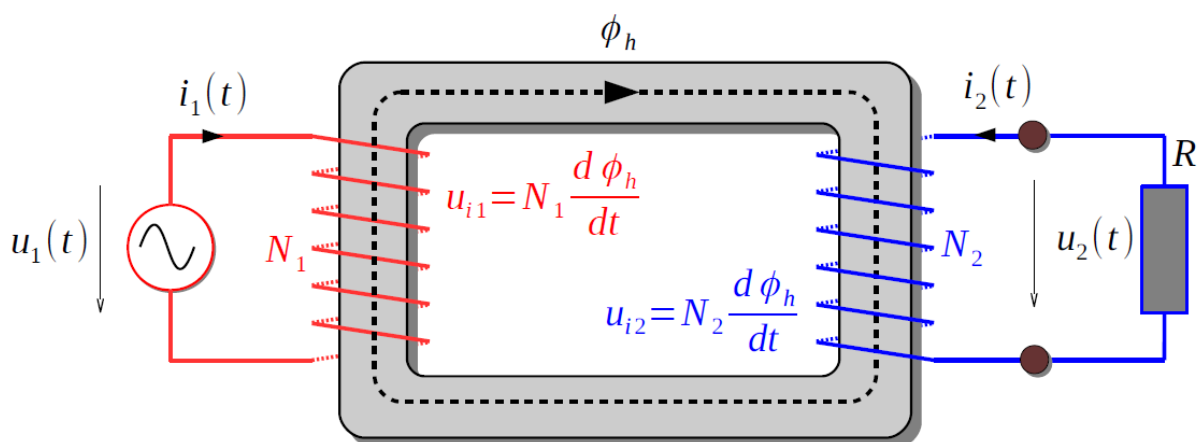
Jak uvidíme později, v magnetickém obvodu jsou též ztráty, které se mění na teplo. Tyto ztráty nahradíme ve schéma odporem R_{Fe} .



Obr. 2-20 Náhradní schéma transformátoru s respektováním ztrát v magnetickém obvodu.

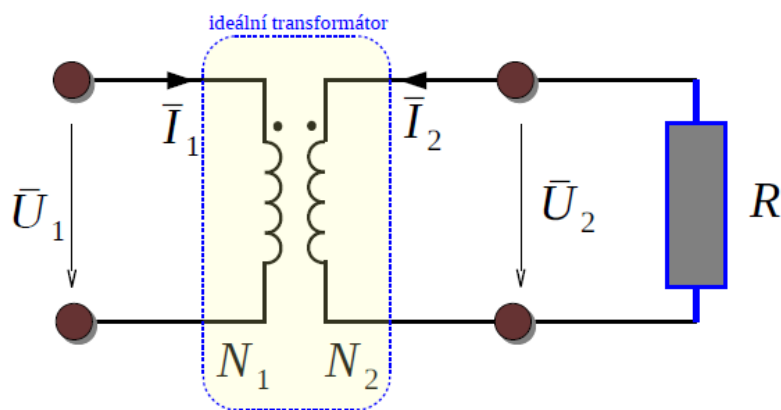
2.6 Náhradní schéma transformátoru – vědecký přístup

V předchozí kapitole jsme popsali vznik náhradního schéma transformátoru intuitivní cestou. Nyní použijeme tytéž zásady a vlastnosti, ale přístup poněkud pozměníme.



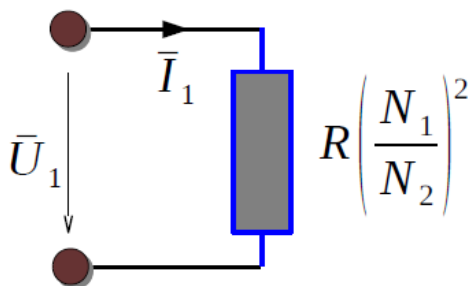
Obr. 2-21 Ideální transformátor, bez odporu vinutí a rozptylu a s nekonečnou magnetickou vodivostí magnetického obvodu.

Tomuto ideálnímu transformátoru odpovídá následující schéma zapojení.



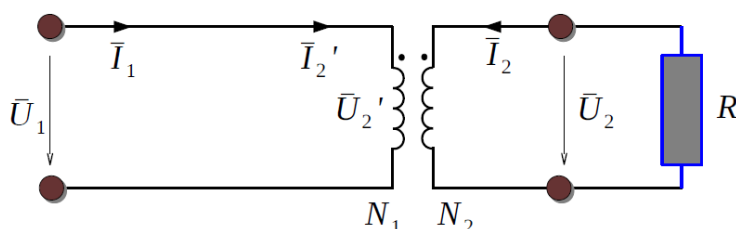
Obr. 2-22 Schéma zapojení pro ideální transformátor, bez odporu vinutí a rozptylu.

Pokud použijeme sekundární zátěž přepočítanou na primární stranu podle předchozí kapitoly, můžeme toto celé schéma zapojení podstatně zjednodušit.



Obr. 2-23 Použití zátěže přepočítané na primární stranu.

Protože již víme a přesvědčili jsem se, že přepočítané veličiny sekundární jsou stejné jako primární, můžeme to zakreslit do schématu.



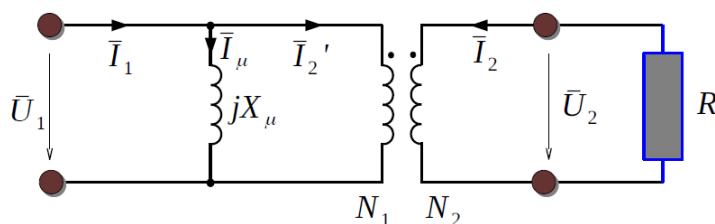
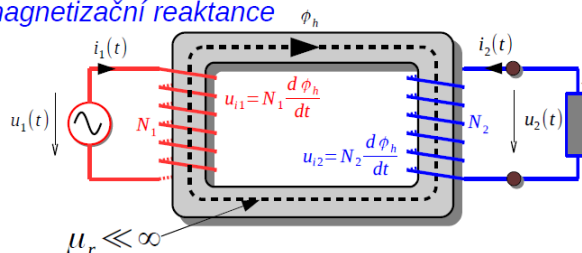
Obr. 2-24 Použití přepočítaných sekundárních veličin na primární straně.

Reálný transformátor však má vodivost magnetického obvodu konečné číslo a proto potřebuje jistý magnetizační proud. Ten do schéma zaneseme dalším prvkem – magnetizační indukčností na napájené straně.

➤ **REÁLNÝ TRANSFORMÁTOR – magnetizační reaktance**

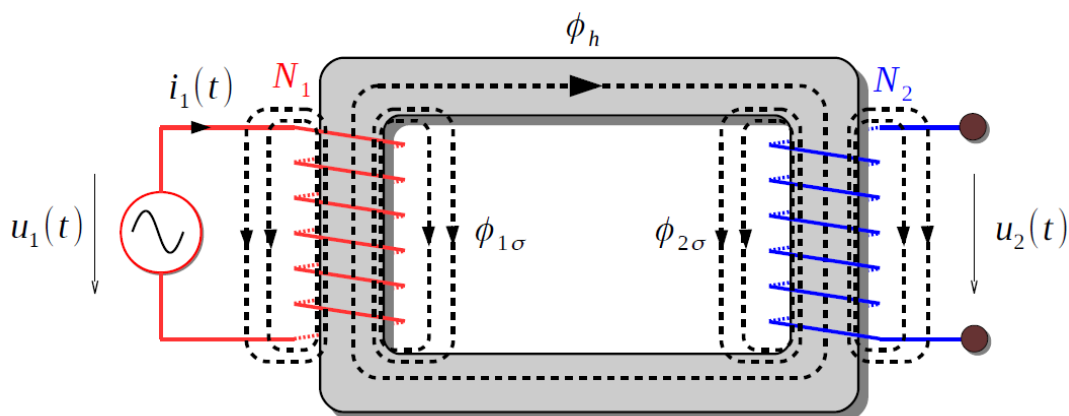
$$N_1 \bar{I}_\mu + N_2 \bar{I}_2 = N_1 \bar{I}_1$$

$$0 = N_1 \bar{I}_1 - N_1 \bar{I}_\mu - N_1 \bar{I}_2'$$



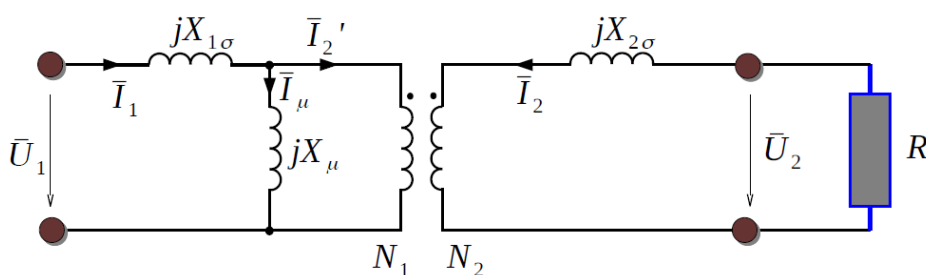
Obr. 2-25 Zavedení magnetizační indukčnosti.

Reálný transformátor má však i další parazitní jevy, a těmi jsou rozptylové toky.



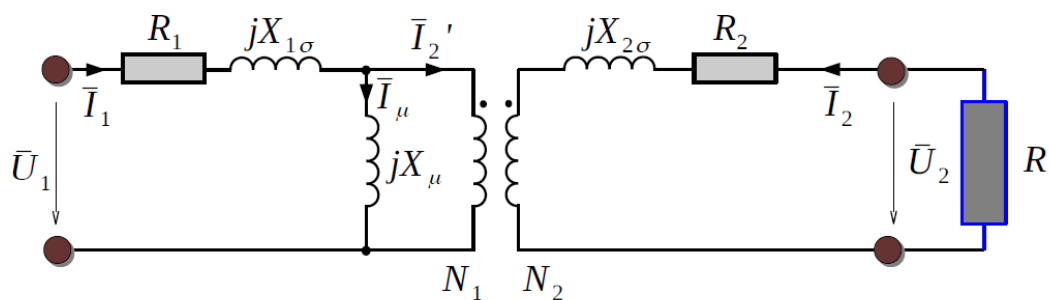
Obr. 2-26 Zavedení rozptylových toků.

Tyto rozptylové toky opět doplníme i do náhradního schéma a to pomocí dvou rozptylových indukčností.



Obr. 2-27 Zavedení rozptylových toků.

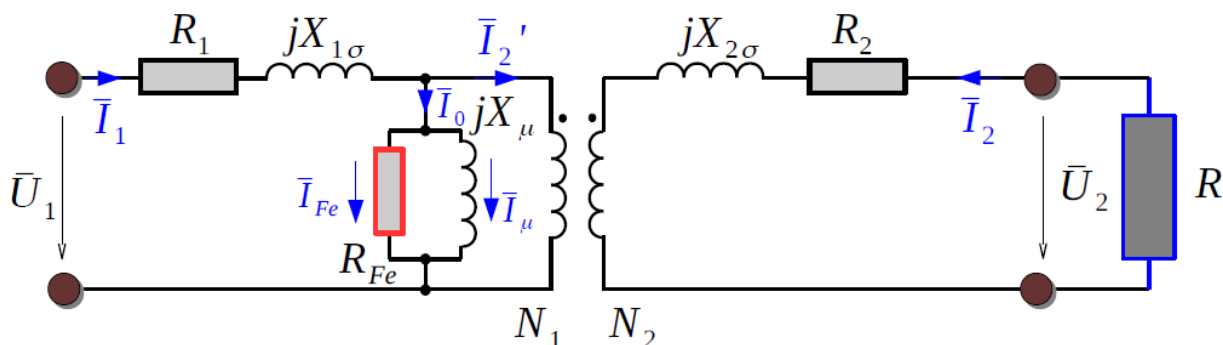
Kromě těchto rozptylů musíme uvažovat u reálného transformátoru také vnitřní odpory vinutí. I tyto odpory zakreslíme do schéma.



Obr. 2-28 Zavedení odporů vinutí.

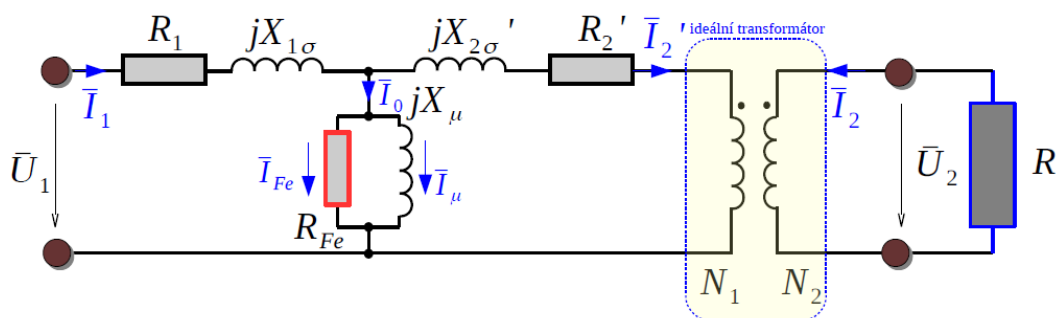
2 Vznik transformátoru

Posledním parazitním jevem, který odlišuje reálný transformátor od ideálního jsou ztráty v magnetickém obvodu vlivem vířivých proudů a hysterezních ztrát ΔP_{Fe} . Tyto ztráty se nevratně mění na teplo a proto zařadíme paralelně odpor R_{Fe} k magnetizační reaktanci.



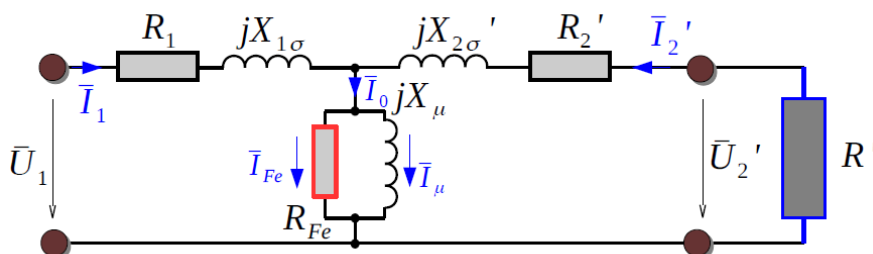
Obr. 2-29 Zavedení ztrát v magnetickém obvodu odporem R_{Fe} .

Pokud nyní použijeme přepočít sekundárních parametrů odporu R_2 a rozptylu $jX_{2\sigma}$ na primární stranu, můžeme přesunout ideální transformátor směrem k sekundární zátěži.



Obr. 2-30 Použití přepočítaných sekundárních parametrů transformátoru na stranu primární.

Ted' ještě přepočítáme i sekundární zátěž na primární stranu, čímž zcela vyloučíme ideální transformátor z elektrického obvodu.



Obr. 2-20 Ideální transformátor je vyloučen použitím přepočítaných parametrů zátěže na primární stranu.

Na první pohled jsme dostali zcela shodné náhradní schéma zapojení. Nicméně jeden podstatný rozdíl zde je – nejsou zde vůbec sekundární veličiny a jedná se pouze o obvod primáru. Můžeme z tohoto náhradního schéma však sekundární fyzické veličiny určit.

2.7 Ztráty v transformátoru

V předchozích kapitolách jsme mluvili o zanedbání ztrát, popř. naopak o zahrnutí ztrát v magnetickém obvodu do náhradního schéma. Nyní jednotlivé druhy ztrát budeme specifikovat podrobněji.

Ztráty ve vinutí ΔP_j

Ve vinutí vznikají tzv. Joulovy ztráty vlivem průchodu proudu. Tyto ztráty se nevratně mění na teplo, které ohřívá vinutí a způsobuje nárůst jeho teploty. Dovolená teplota vinutí je dána teplotní třídou izolace vodičů a to, abychom ji nepřekročili, musí zajistit správný návrh transformátoru a zejména pak jeho chladicí systém.

V primárním vinutí jsou ztráty dány vztahem

$$\Delta P_{j1} = R_1 I_1^2 \quad (2.20)$$

a v sekundárním vinutí obdobně

$$\Delta P_{j2} = R_2 I_2^2 \quad (2.21)$$

kde R_1 a R_2 jsou odpory vinutí.

V případě trojfázových transformátorů jsou vztahy analogické

$$\Delta P_{j1} = R_{1L1} I_{1L1}^2 + R_{1L2} I_{1L2}^2 + R_{1L3} I_{1L3}^2 \quad (2.22)$$

a pro sekundární vinutí

$$\Delta P_{j2} = R_{2L1} I_{2L1}^2 + R_{2L2} I_{2L2}^2 + R_{2L3} I_{2L3}^2 \quad (2.23)$$

Při stavu naprázdno jsou tyto ztráty v primárním vinutí zanedbatelně malé a v sekundárním vinutí přímo nulové.

Ztráty v magnetickém jádře ΔP_{Fe}

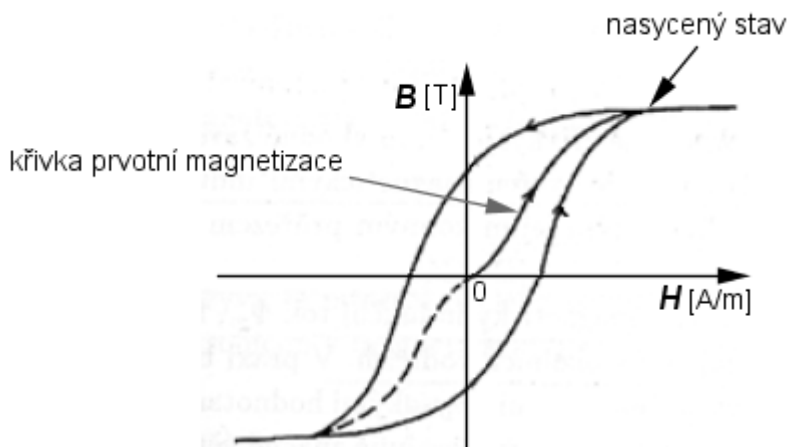
Tyto ztráty mají dvě složky – ztráty hysterezní a ztráty vířivými proudy.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{FeH} + \Delta P_{FeV} \quad (2.24)$$

Ztráty hysterezní jsou způsobeny přemagnetováním magnetického materiálu a jsou v podstatě určeny plochou hysterezní smyčky. Pro jejich snížení se pro výrobu jádra používají magneticky měkké materiály s úzkou hysterezní smyčkou.

Tyto ztráty jsou úměrné kvadrátu napětí a přímo úměrně kmitočtu

$$\Delta P_{FeH} \approx U^2, f \quad (2.25)$$



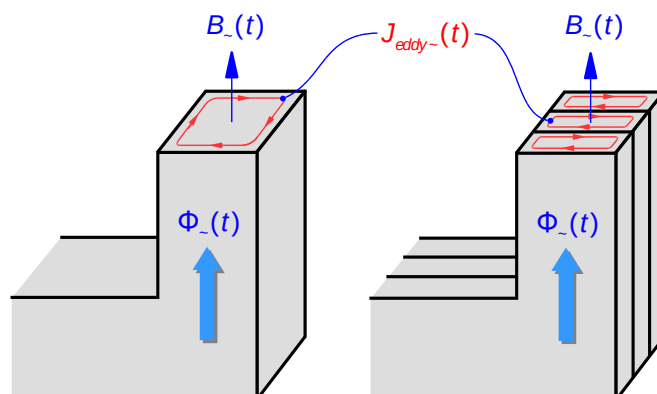
Obr. 2-20 Hysterezní smyčka magnetického materiálu. Její plocha je úměrná hysterezním ztrátám magnetického obvodu.

Ztráty vířivými proudy jsou úměrné kvadrátu napětí a kvadrátu kmitočtu.

$$\Delta P_{FeV} \approx U^2, f^2 \quad (2.26)$$

Pro jejich snížení se jádro nevyrobí z masivního materiálu, ale dělá se složené z jednotlivých listů, od sebe navzájem izolovaných. Tuto izolaci může tvořit třeba i jen ušlechtilý oxid, protože napětí mezi plechy je velmi malé, jen několik desetin voltu.

Tloušťka plechů je běžně 0,5mm a 0,35 mm, ale i menší.



Obr. 2-21 Schéma vzniku vířivých proudů v jádře.



Obr. 2-22 Listěný magnetický obvod.

2.8 Rovnice pro indukované napětí a její využití

Nejprve se podívejme, jak se určí průřez jádra transformátoru S_{Fe} . Musí být totiž schopen přenášet potřebné množství magnetické energie a nepřesytit se nad únosnou mez. Pro první odhad průřezu magnetického jádra lze použít přibližný vztah na základě přenášeného zdánlivého výkonu jádrem

$$S_{Fe} (cm^2) = \sqrt{S(VA)} \quad (2.27)$$

V dříve uvedeném příkladu transformátoru 230/23V byl zdánlivý výkon $S=230VA$, proto by průřez jádra byl přibližně $16 cm^2$ a to je jádro čtvercového průřezu se stranou 4cm. Samozřejmě, že jádro může mít průřez i jiného tvaru, než jen čtverec.

Běžné magnetické materiály pro malé transformátorky mají $B_m=1,3T$. To lze zjistit z katalogů výrobců.

Proto dosazením do rovnice indukovaného napětí

$$U_i = 4,44 N \Phi_{1m} f = 4,44 N B_m S_{Fe} f = 4,44 \cdot N_1 \cdot 1,3 \cdot 16 \cdot 10^{-4} \cdot 50 = 230 \quad (2.28)$$

Dostaneme počet závitů primárního vinutí $N_1=498$, tj. prakticky $N_1=500$. Počet závitů sekundárního vinutí bude při zanedbání ztrát $N_2=50$.

Tyto hodnoty shrneme do tabulky a budeme sledovat vliv změny počtu závitů a průřezu magnetického obvodu a pak také vliv kmitočtu.

Tab 2-1: Vliv parametrů na rozměry transformátoru

ř.	napětí	konst.	závity	Mag. indukce	Průřez jádra	Kmitočet	komentář
(-)	$U_i (V)$	(-)	$N (-)$	$B_m(T)$	$S_{Fe} (m^2)$	$f(Hz)$	
1	23	4,44	50	1,3	$16 \cdot 10^{-4}$	50	Základní návrh
2	23	4,44	5	1,3	$160 \cdot 10^{-4}$	50	Zvýšení průřezu jádra = méně závitů
3	23	4,44	5	1,3	$16 \cdot 10^{-4}$	500	Zvýšení kmitočtu měničem= méně závitů
4	23	4,44	5	1,3	$1,6 \cdot 10^{-4}$	5000	Další zvýšení kmitočtu měničem= méně závitů+menší průřez

V řádce č. 1 vidíme základní návrh pro 50 Hz. Pokud použijeme v ř. 2 větší jádro (10x), klesne nám (také 10x) počet závitů. Zde vidíme, že lze návrh přizpůsobovat dané aplikaci, podle zadání od zákazníka. „Více Cu znamená méně Fe a naopak“.

Pokud pro napájení (např. ve zdroji, svářečce atp.) použijeme místo sítě měnič a vyšší kmitočet, můžeme zmenšit potřebné množství mědi Cu (ř. 3) nebo současně i množství materiálu potřebného pro jádro (ř. 4). Takovýto transformátor (asi od kmitočtu 400Hz) však již nemůže mít jádro železné, ale feritové. V každém případě to však znamená zmenšení hmotnosti a rozměrů transformátoru.



Otázky k tématu:

- Pokud mají dvě cívky společný tok a jednu cívku napájíme DC proudem, může se do druhé cívky něco indukovat, pokud se cívky nepohybují? Pouze při zapnutí / vypnutí DC proudu nebo jiné změně DC proudu. Jinak nikoliv.
- Má plášťová konstrukce jádra transformátoru všude stejný průřez?
- Na jaký parametr Tr má vliv způsob provedení cívek?
- Jak je definován převod transformátoru a jak jej lze určit?
- Prevod transformátoru může být číslo menší než 1 ?



Správné odpovědi

- Pokud mají dvě cívky společný tok a jednu cívku napájíme DC proudem, může se do druhé cívky něco indukovat, pokud se cívky nepohybují?

Pouze při zapnutí / vypnutí DC proudu nebo jiné změně DC proudu. Jinak nikoliv.

- Má plášťová konstrukce jádra transformátoru všude stejný průřez?

Nemá. Krajní - pomocná - jádra mají průřez poloviční.

- Na jaký parametr Tr má vliv způsob provedení cívek?

Na velikost napětí nakrátko, tj. na tvrdost zdroje napětí

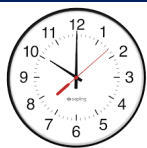
- Jak je definován převod transformátoru a jak jej lze určit?

Převod je definován poměrem indukovaných napětí a lze jej určit pomocí svorkových napětí, proudů vinutím nebo pomocí počtu závitů dle vztahu (2.14).

- Prevod transformátoru může být číslo menší než 1 ?

Ano, pak se jedná o zvyšovací transformátor.

3 Spotřebičový systém



Předpokládaný čas: 35 min



Po prostudování tématu budete:

- *Mít přehled o orientaci napětí a proudu zdrojového systému*
- *Mít přehled o orientaci napětí a proudu spotřebičového systému*
- *Vědět, jak používat fázory pro znázornění jakékoliv kombinace činného a jalového výkonu, dodávky a odběru*

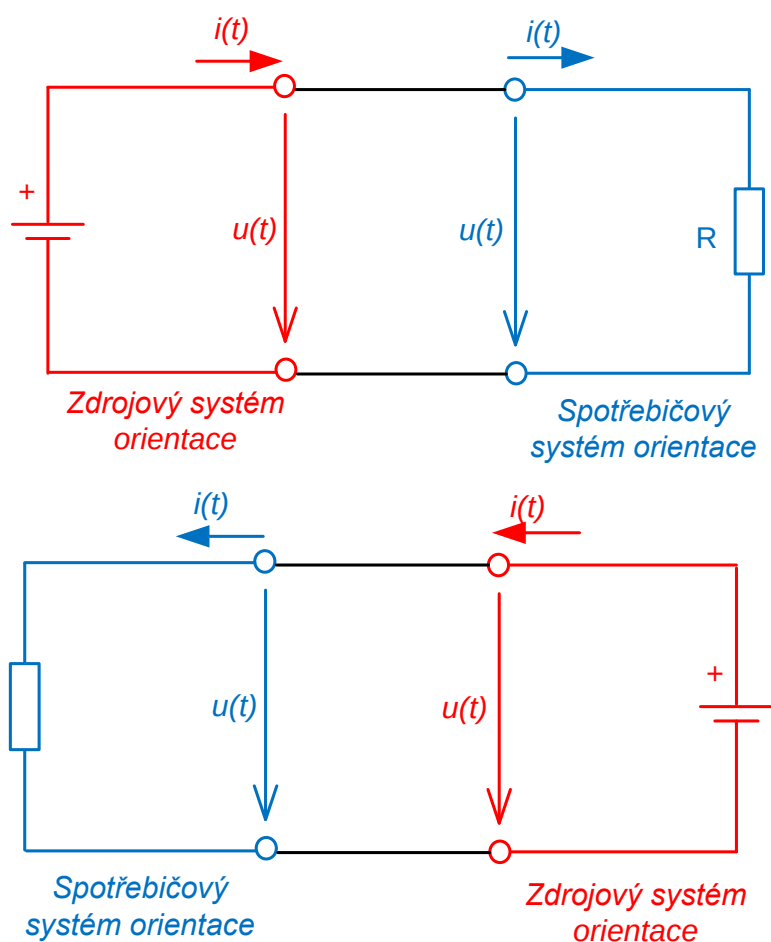
Faradayův indukční zákon v diferenciálním tvaru je vyjádřen vztahem

$$u_i = - \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (3-1)$$

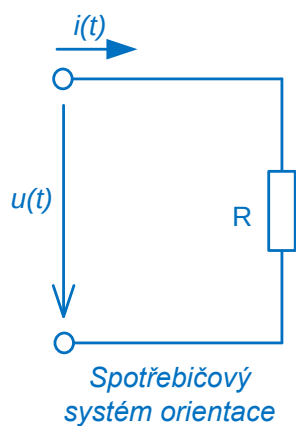
Na základní prvky R-L-C, ale i na elektrické stroje, se můžeme dívat jako na dvojpóly. V obecném případě se na dvojpól můžeme dívat ze dvou hledisek. Buď se jedná o zdroj nebo o spotřebič. Proto máme i dvě možnosti, jaký systém orientace napětí a proudu zvolit. Možnosti jsou dvě:

- Spotřebičový systém orientace
- Zdrojový systém orientace

Každý dvojpól totiž může být orientován v obou režimech a podle toho se liší orientace (šipky) napětí a proudu. Odpor nemůže nikdy pracovat jako zdroj. To použijeme jako základ pro definici spotřebičové orientace.

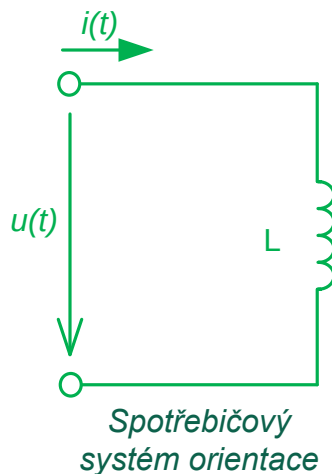


Obr. 3-1 Stejnosměrný zdroj a spotřebič a jejich orientace napětí a proudu. Je lhostejné, zda se zdroj či spotřebič nachází ve schématu vpravo nebo vlevo. Je však zvykem mít tok výkonu zleva doprava, tj. mít zdroj vlevo.

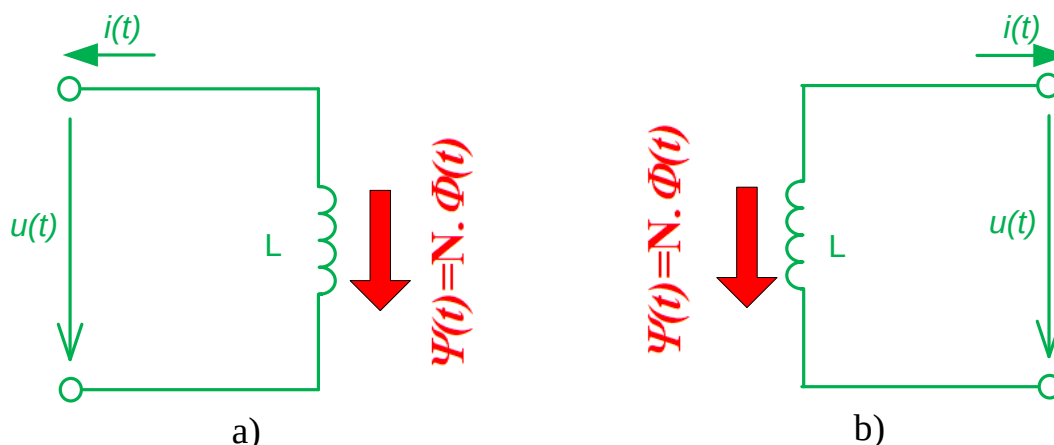


Obr. 3-2 Vzájemná orientace okamžité hodnoty napětí a proudu na odporu - spotřebiči

U cívky, kondenzátoru a také u elektrického stroje však můžeme někdy z jejich svorek výkon odebírat, tj. chovají se jako zdroje. Proto je možná nejen spotřebičová orientace (cívka je spotřebič výkonu), ale také zdrojová orientace (cívka je zdrojem výkonu).



Obr. 3-3 Cívka ve spotřebičovém systému.



Obr. 3-4 Cívka ve zdrojovém režimu. Je lhostejné, zda je vývod – svorky- ve schéma vpravo (b) nebo vlevo (a).

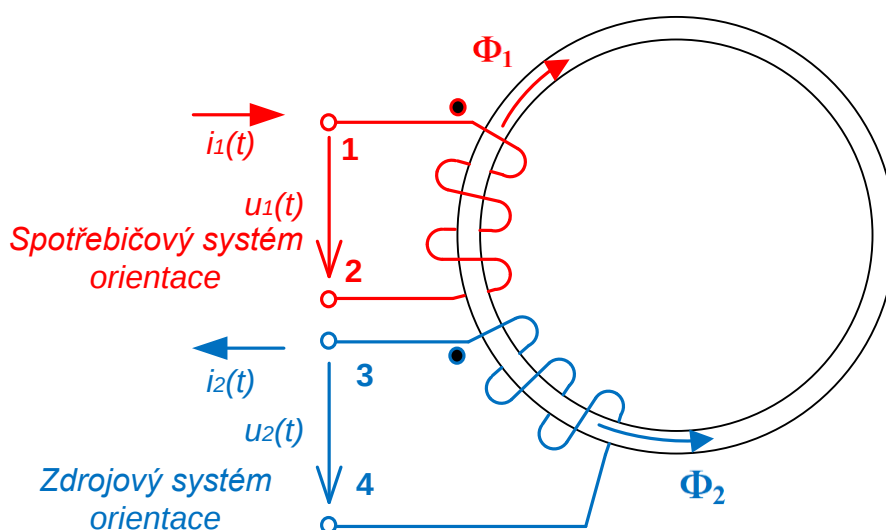
Spotřebičový režim:

- Orientace svorkového napětí $u(t)$ je vůči proudu $i(t)$ souhlasná.
- Cívka je připojena na zdroj napětí $u(t)$, odebírá z něj proud $i(t)$ a proto z něj odebírá energii a chová se jako spotřebič. Tuto elektrickou energii pak přeměňuje na energii magnetického pole.

- Mezi směrem proudu a směrem toku platí pravidlo pravé ruky, tj. pokud nám prsty pravé ruky ukazují směr proudu v cívkce, vztyčený palec ukazuje směr magnetického toku.

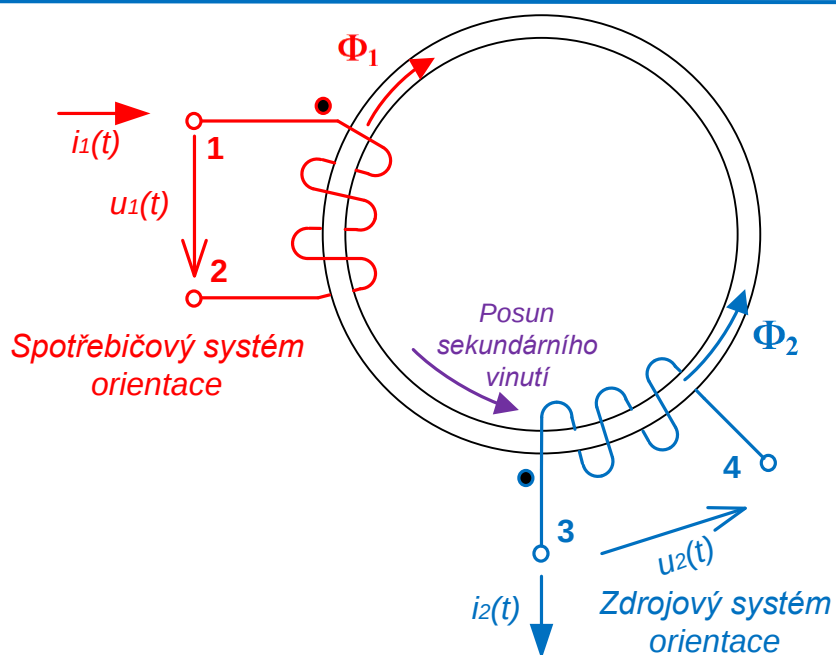
Zdrojový režim:

- Orientace svorkového napětí $u(t)$ je vůči proudu $i(t)$ nesouhlasná.
- Cívka je vložena do proměnného magnetického pole $B(t)$, prochází jí tok $\Phi(t)$, její závity mají spřažený tok $\Psi(t)$ a na jejích svorkách vzniká indukované napětí $u(t)$. Z cívky se stal zdroj elektrického napětí $u(t)$, tj. generátor. Připojíme-li nyní na svorky cívky odporovou zátěž, začne do této zátěže cívka (generátor) dodávat elektrickou energii.

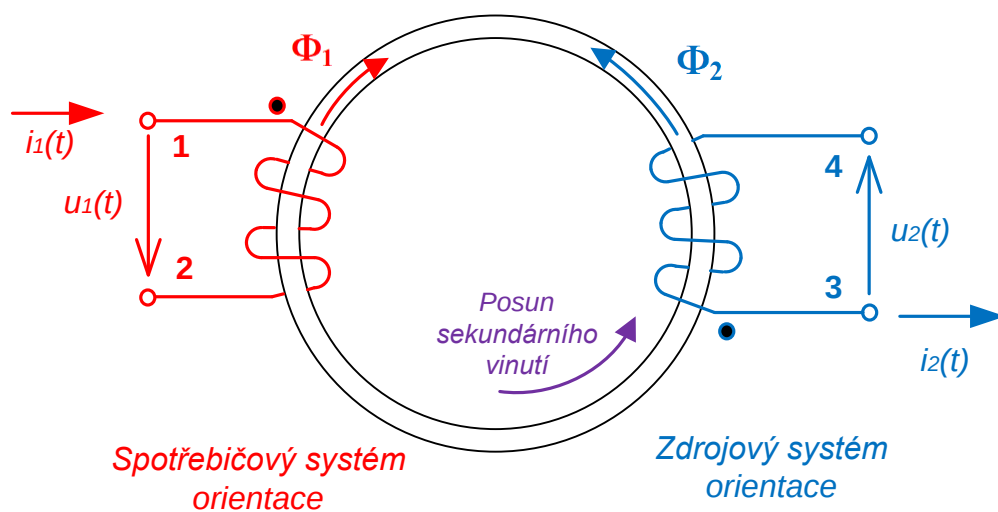


Obr. 3-5 Princip transformátoru. Primární cívka (1) pracuje jako spotřebič a je zakreslena ve spotřebičovém systému, sekundární cívka (2) se chová jako zdroj a je zakreslena ve zdrojovém systému.

Cívka sekundární „je přímým pokračováním“ vinutí cívky primární. Pokud bychom svorky **2** a **3** propojily, vznikla by jedna cívka (s odbočkou). Magnetické účinky obou částí se pak sčítají. Cívky jsou však na obrázku rozděleny a sekundární vinutí působí svým tokem Φ_2 proti toku primární cívky Φ_1 .



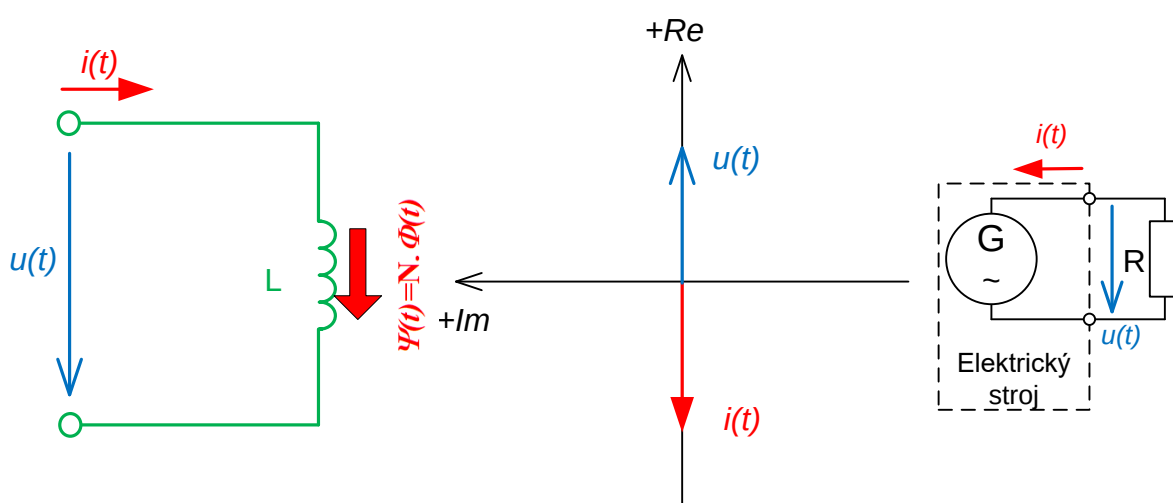
Obr. 3-6 Přesun cívky. Sekundární cívku (2) přesuneme od primární (1) na opačnou – protilehlou - stranu jádra.



Obr. 3-7 Přesun cívky. Sekundární cívku (2) přesuneme od primární (1) na opačnou – protilehlou - stranu jádra.

Volba znaménka a tím i spotřebičového nebo zdrojového systému je věcí dohody. V elektrických strojích i výkonové elektronice je zvykem (dohodou) uvažovat **zásadně spotřebičový systém**.

Přesto je však možné i v tomto spotřebičovém systému mít cívku (spotřebič) použitou jako zdroj elektrické energie (generátor). Tento „generátor“ však proud neodebírá, ale dodává, vyrábí. Fázor napětí necháme položený v kladném reálném směru. Abychom proto vyjádřili výrobu – dodávku - proudu, musíme při kreslení fázoru proudu tento fázor nakreslit opačně, záporně, „v protifázi“. Tím vyjádříme, že se spotřebič zakreslený ve schématu se spotřebičovým systémem chová jako zdroj.

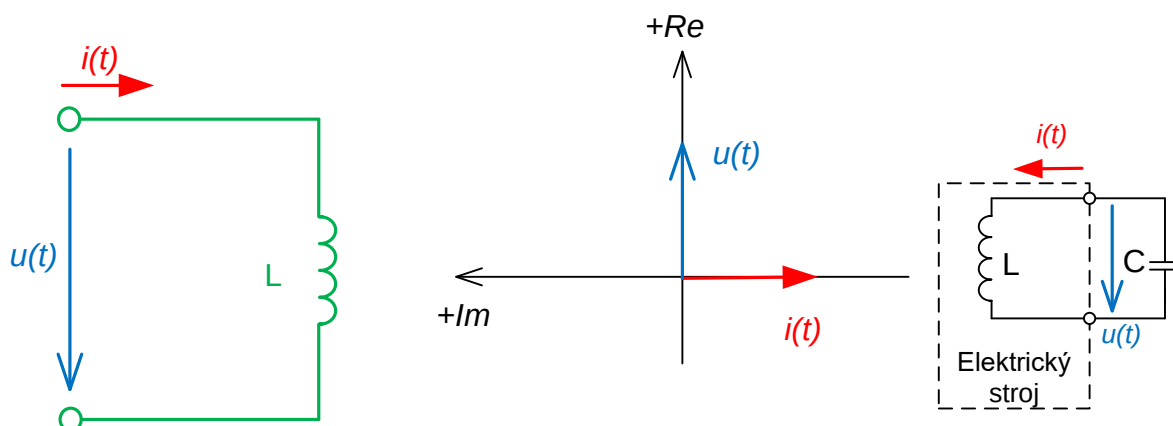


Obr. 3-8 Cívka se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, ovšem pracující v režimu zdroje – generátoru (indukuje se v ní napětí). Elektrický stroj - generátor – dodává pouze činný výkon.

Připomeňme si na tomto místě větu, totiž že: „Každý dvojpól může být orientován v obou režimech a podle toho se liší orientace (šipky) napětí a proudu.“

Předchozí obrázek platí v obvodech, kde se vyskytuje pouze činný výkon. Napětí je reálné kladné a proud, který cívka – generátor - vyrábí a dodává jako zdroj, je reálný záporný. Proto je i činný příkon spotřebiče (máme zavedený spotřebičový systém) záporný a jedná se ve skutečnosti o činný výkon dodávaný zdrojem. Tímto zdrojem nyní fyzikálně cívka skutečně je.

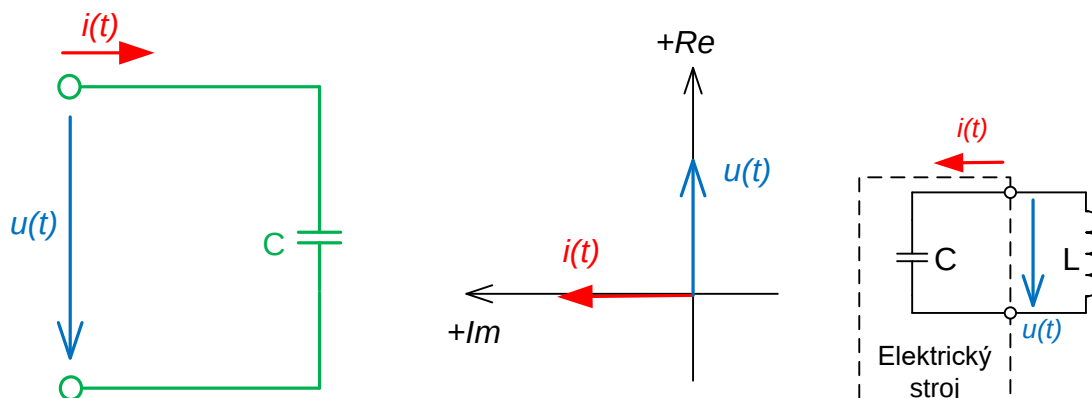
Abychom mohli zavedený spotřebičový systém používat i ve střídavých (AC) obvodech s jalovými výkony, podívejme se nyní na vzájemnou polohu napětí a proudu u cívky zapojené do AC obvodu. Víme, že ideální indukčnost má proud zpožděn o 90° za napětím.



Obr. 3-9 Cívka se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu spotřebiče v AC obvodě. Elektrický stroj spotřebovává pouze jalový induktivní výkon.

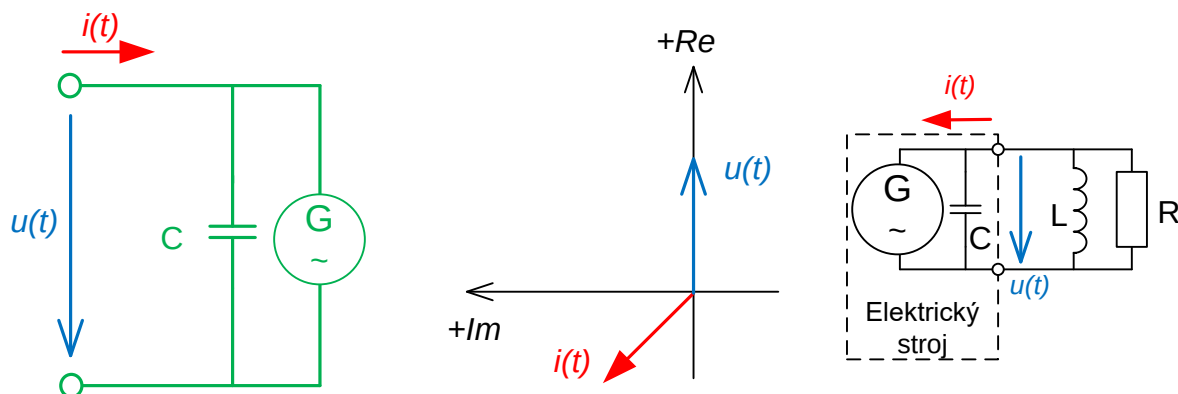
Elektrický stroj však může pracovat nejen jako spotřebič jalového induktivního výkonu, ale i jako generátor induktivního jalového výkonu. (Jak uvidíme později, jedná se o přebuzený synchronní generátor v režimu kompenzátoru). Protože se však pohybujeme ve spotřebičovém systému, bude se chovat jako spotřebič kapacitního jalového výkonu.

Postupujme analogicky. Když jsme chtěli vyjádřit, že stroj nepracuje jako spotřebič činného výkonu, ale jako generátor, obrátili jsme orientaci proudu o 180° . Když nyní chceme vyjádřit, že stroj (cívka) nepracuje jako spotřebič induktivního jalového výkonu, ale jako jeho zdroj, také obrátíme směr proudu o 180° vzhledem k předchozímu případu.



Obr. 3-10 Stroj se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu generátoru jalového induktivního výkonu v AC obvodě.

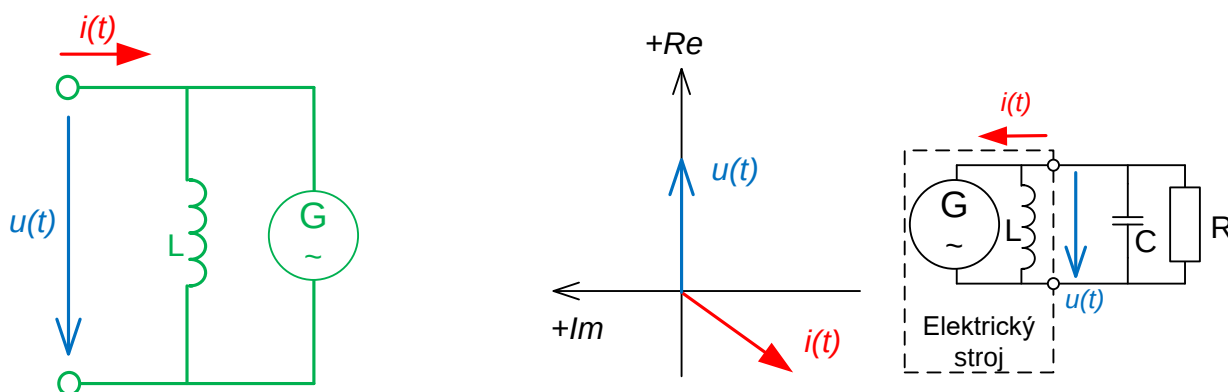
Pokud by tento generátor nevyráběl pouze induktivní jalový výkon, ale také činný výkon, bude jeho fázor proudu zakreslen obecně „někde“ ve III. kvadrantu.



Obr. 3-11 Stroj se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu generátoru činného a generátoru jalového induktivního výkonu v AC obvodě.

Tento typ zátěže R-L je v síti nejobvyklejší.

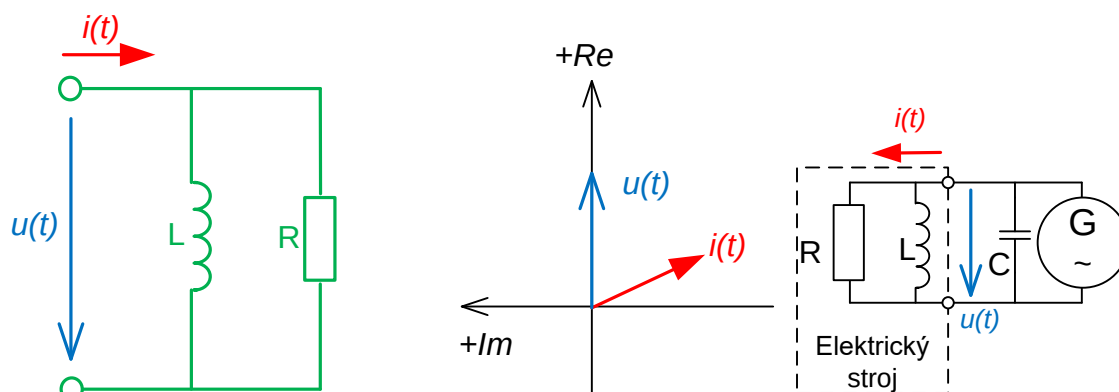
Dalším případem je situace, že bude stroj (generátor) činný výkon vyrábět a jalový induktivní výkon odebírat. Takto se běžně chovají malé vodní elektrárny s asynchronním generátorem. Pak bude fázor proudu zakreslen obecně „někde“ ve IV. kvadrantu.



Obr. 3-12 Cívka se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu generátoru činného výkonu a spotřebiče jalového induktivního výkonu v AC obvodě.

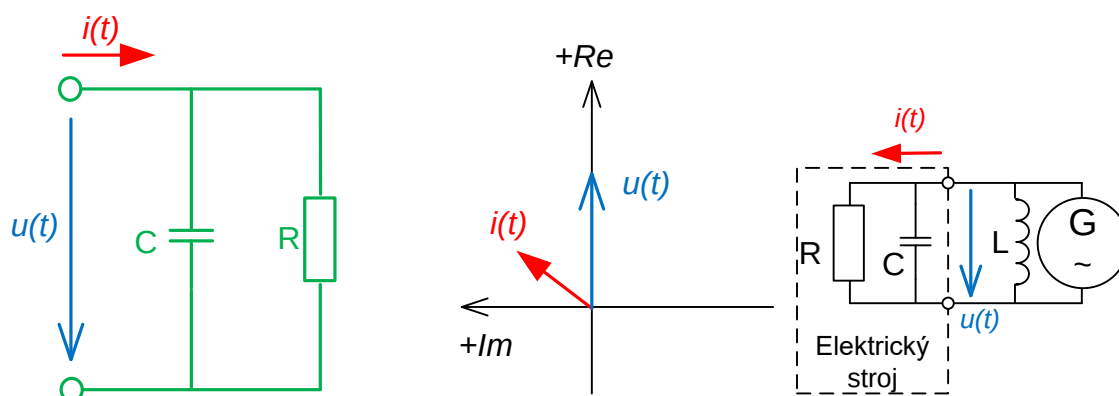
Běžný asynchronní motor nemá pouze indukčnost, ale též jistý parazitní vnitřní odpor. Pokud jej proto zapojíme ke zdroji AC napětí, bude odebírat nejen induktivní jalový výkon, ale též jistý činný výkon. Právě zejména odebraný činný výkon se v asynchronním motoru změní na mechanický výkon (pohyb na hřídeli),

odebíraný po hřídeli čerpadlem, převodovkou, ventilátorem apod. Fázor proudu pak bude v prvním I. kvadrantu.



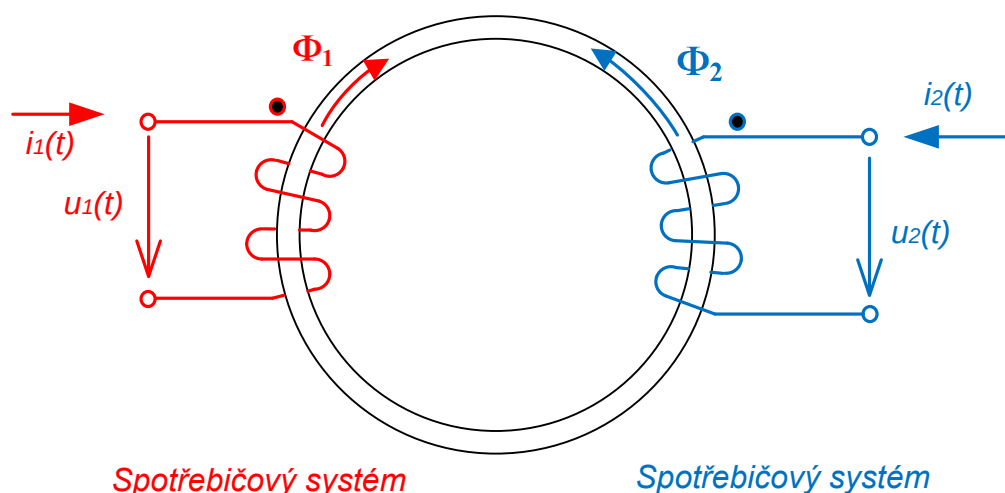
Obr. 3-13 Stroj se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu spotřebiče činného výkonu a spotřebiče jalového induktivního výkonu v AC obvodě.

Výše popsáný asynchronní motor odebírá ze sítě jalový příkon. Proto je nutné jej v průmyslu kompenzovat, například kondenzátorem. Dle platných norem není překompenzování sice dovoleno, ale pokud by k tomu došlo, byl by stroj (motor) nejen spotřebičem činného výkonu, ale protože by se jednalo o „překompenzovaný motor“, byl by i generátorem jalového induktivního výkonu. Protože se pohybujeme pořád ve spotřebičové soustavě, místo „generátor jalového induktivního výkonu“ lze použít termín „spotřebič kapacitního jalového výkonu“.



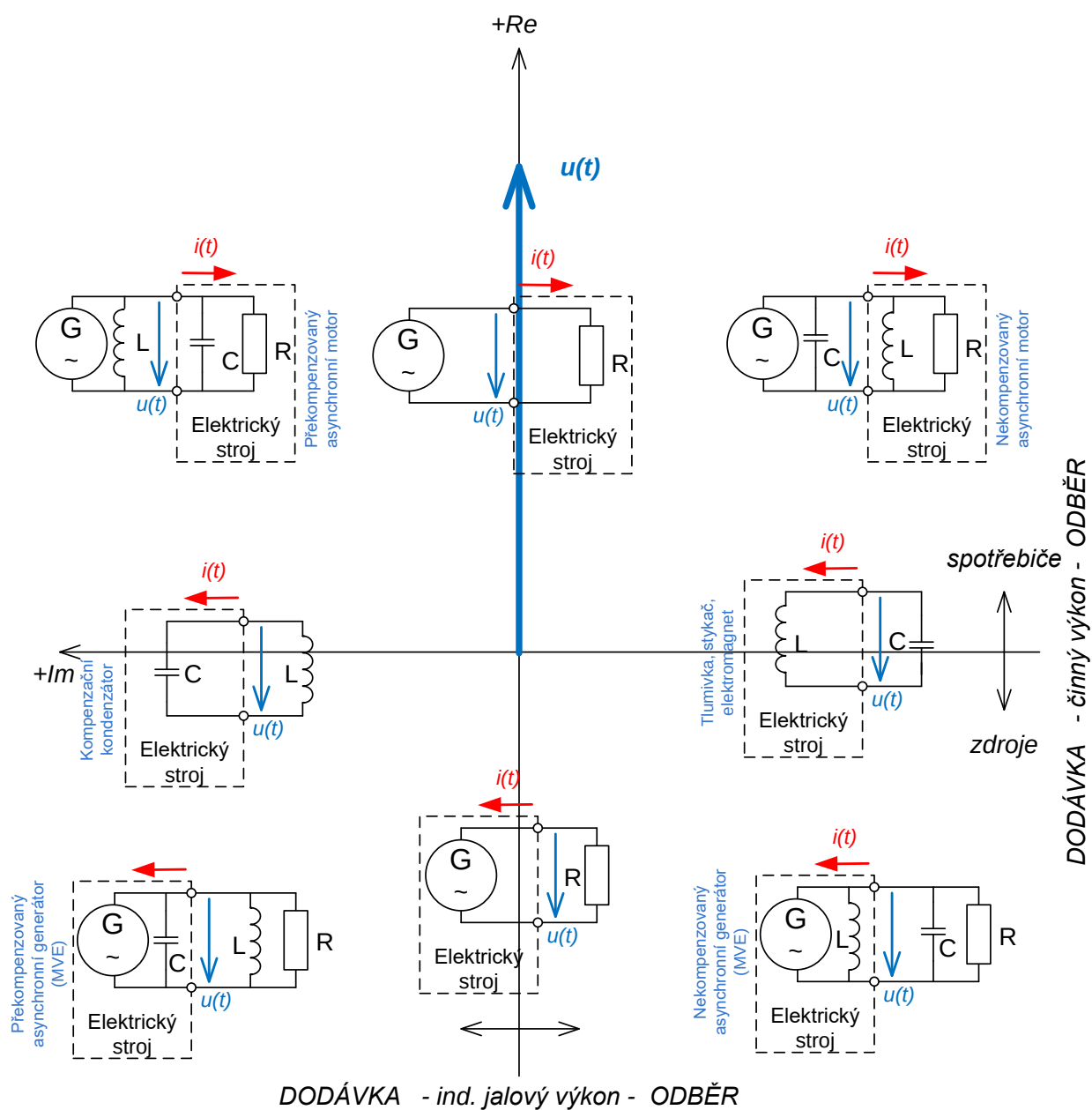
Obr. 3-14 Stroj se zakreslenou orientací napětí a proudů ve spotřebitelském systému, pracující v režimu spotřebiče činného výkonu a generátoru jalového induktivního výkonu v AC obvodě.

Na základě předchozích poznatků proto můžeme překreslit primární a sekundární obvod transformátoru, nyní již oba ve spotřebičovém systému.



Obr. 3-15 Princip transformátoru, překresleno do spotřebičového systému na primární i sekundární straně.

Poznamenejme, že termín „spotřebičový systém“ je jen věcí dohody lidí – elektrotechniků - a nemůže mít vliv na fyzikální chování vinutí. Proto se změnou značení sekundární orientace napětí a proudů nesmí změnit fyzikální chování, tj. směr toku. Proto obrátíme nejen orientaci napětí, ale i polohu referenčního znaku.



Obr. 3-16 Souřadnicové osy pro fázory spotřebičového systému.



Otázky k tématu:

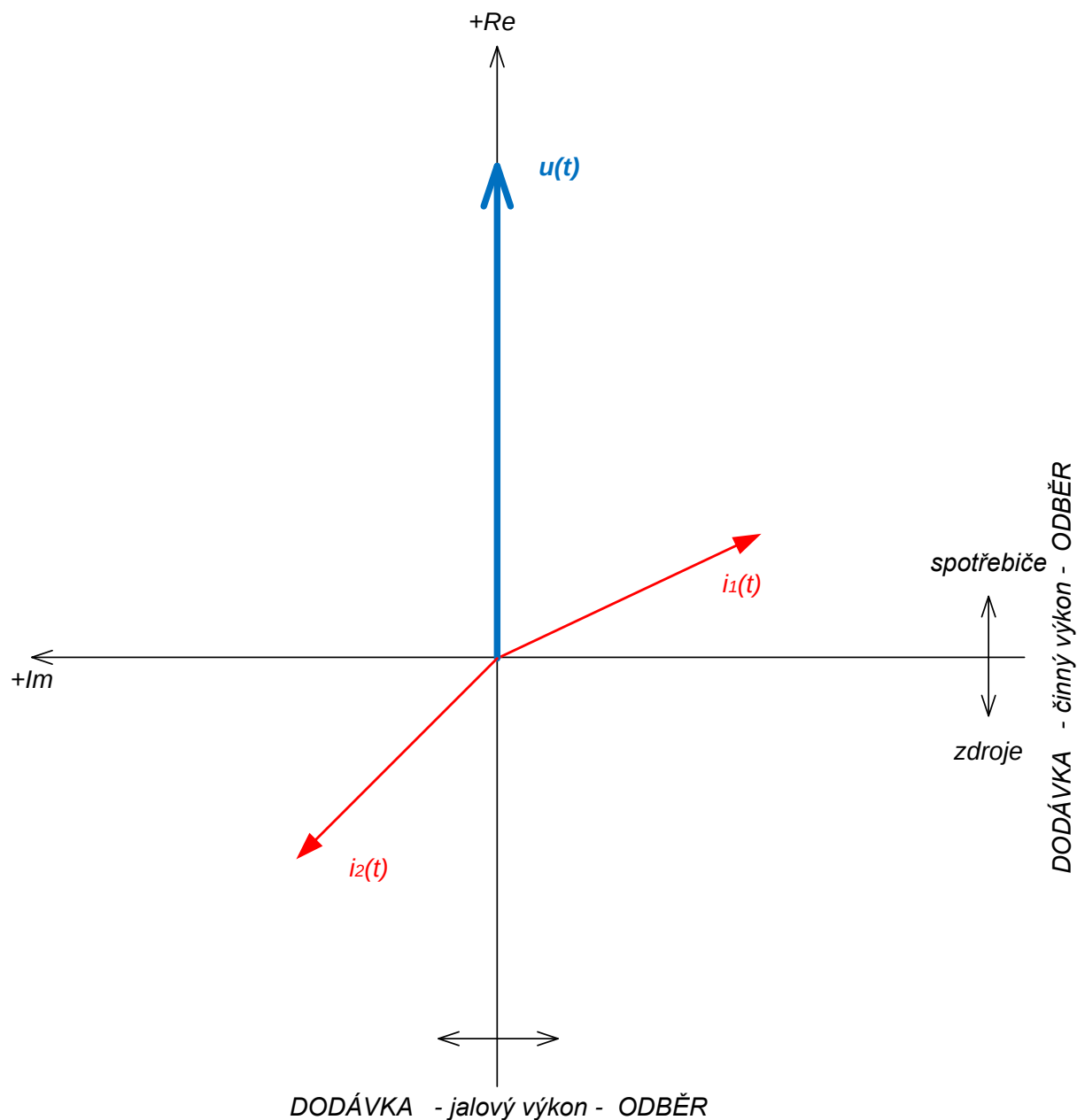
- *Zakreslete do souřadnicového systému primární a sekundární proud transformátoru.*
 - *V jakém kvadrantu bude statorový proud přebuzeného synchronního generátoru, který vyrábí činný i induktivní jalový výkon?*
 - *V jakém kvadrantu bude statorový proud přebuzeného synchronního motoru, který odebírá činný a vyrábí induktivní jalový výkon?*
-



Správné odpovědi

- *Zakreslete do souřadnicového systému primární a sekundární proud transformátoru.*

Primární vinutí (1) se chová jako spotřebič činného i jalového induktivního výkonu. Sekundární vinutí (2) se chová jako zdroj, který je zatížen (dodává) činný výkon a induktivní jalový výkon. Proud primáru (1) a sekundáru (2) jsou téměř v protifázi.



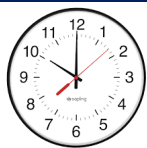
- V jakém kvadrantu zavedeného spotřebičového systému bude statorový proud přebuzeného synchronního generátoru, který vyrábí činný i induktivní jalový výkon?

Ve III. kvadrantu.

- V jakém kvadrantu zavedeného spotřebičového systému bude statorový proud přebuzeného synchronního motoru, který odebírá činný a vyrábí induktivní jalový výkon?

V II. kvadrantu.

4 Fázorový diagram transformátoru



Předpokládaný čas: 20 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o měřítku napětí i proudu fázorového diagramu
- Umět nakreslit složky proudu naprázdno i proud naprázdno
- Vědět, jak se zakreslí R-L-C zatížení sekundárního vinutí
- Umět vysvětlit polohu úbytků napětí na primáru i sekundáru

4.1 Souřadný systém

V předchozí kapitole jsme zavedli spotřebičový systém. Nyní jej použijeme pro zobrazení veličin v náhradním schéma transformátoru ve tvaru „T-článku“. Zobrazíme do něj

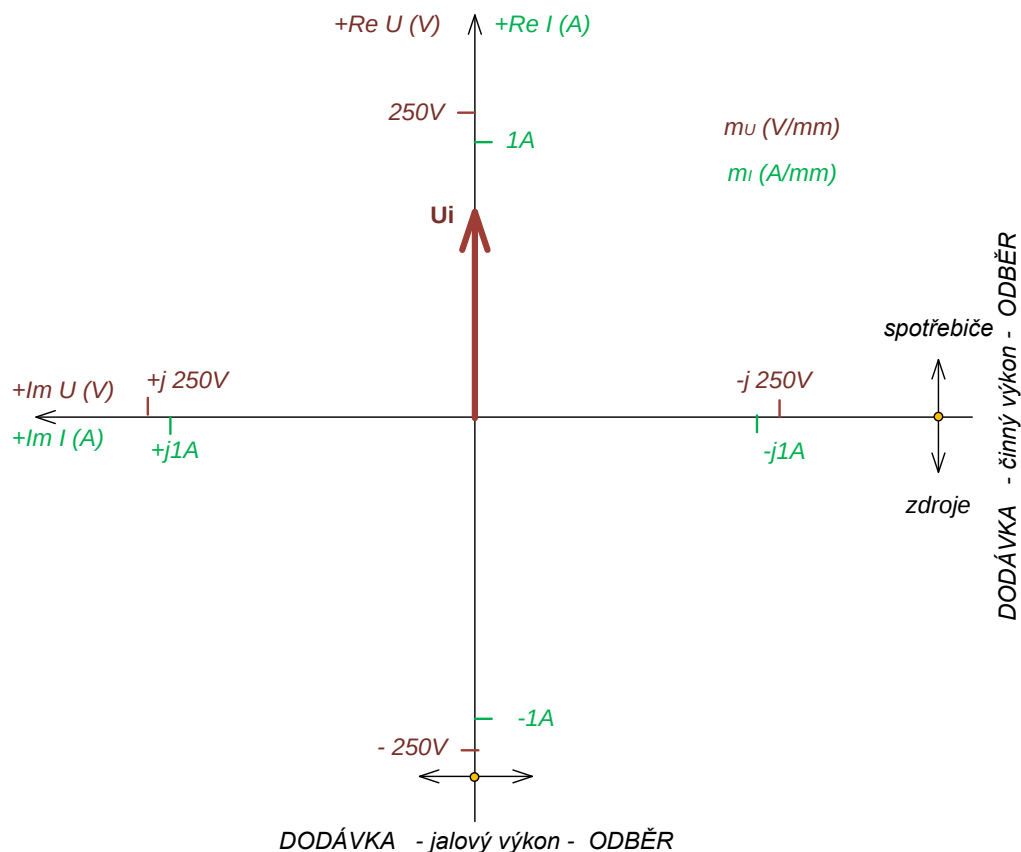
- Vstupní a výstupní napětí a proudy
- Indukované napětí
- Proud v příčné větvi
- Úbytky napětí na podélných parametrech náhradního schéma

Diagram sice nebudeme nyní kreslit přesně v měřítku, nicméně jisté poměry velikostí a úhlů bude vhodné dodržet. Pokud bychom diagram měli v měřítku nakreslit, je nutné si nejprve zvolit měřítko napětí m_U (V/mm) a měřítko proudů m_I (A/mm).

V každém případě budeme zobrazovat primární veličiny a veličiny sekundární přepočítané na stranu primární. Tím se totiž konstrukce značně usnadní. Pokud bychom použili přímo fyzické sekundární veličiny, byly by vzhledem k primárním při velkém převodu transformátoru obtížně zobrazitelné.

Souřadný systém má na reálné i imaginární ose dvě stupnice – jednu pro napětí, druhou pro proudy.

Kreslit začneme od indukovaného napětí U_i na příčné větvi.



Obr. 4-1 Souřadný systém pro transformátor s příslušnými měřítky (příklad) a indukovaným napětím.

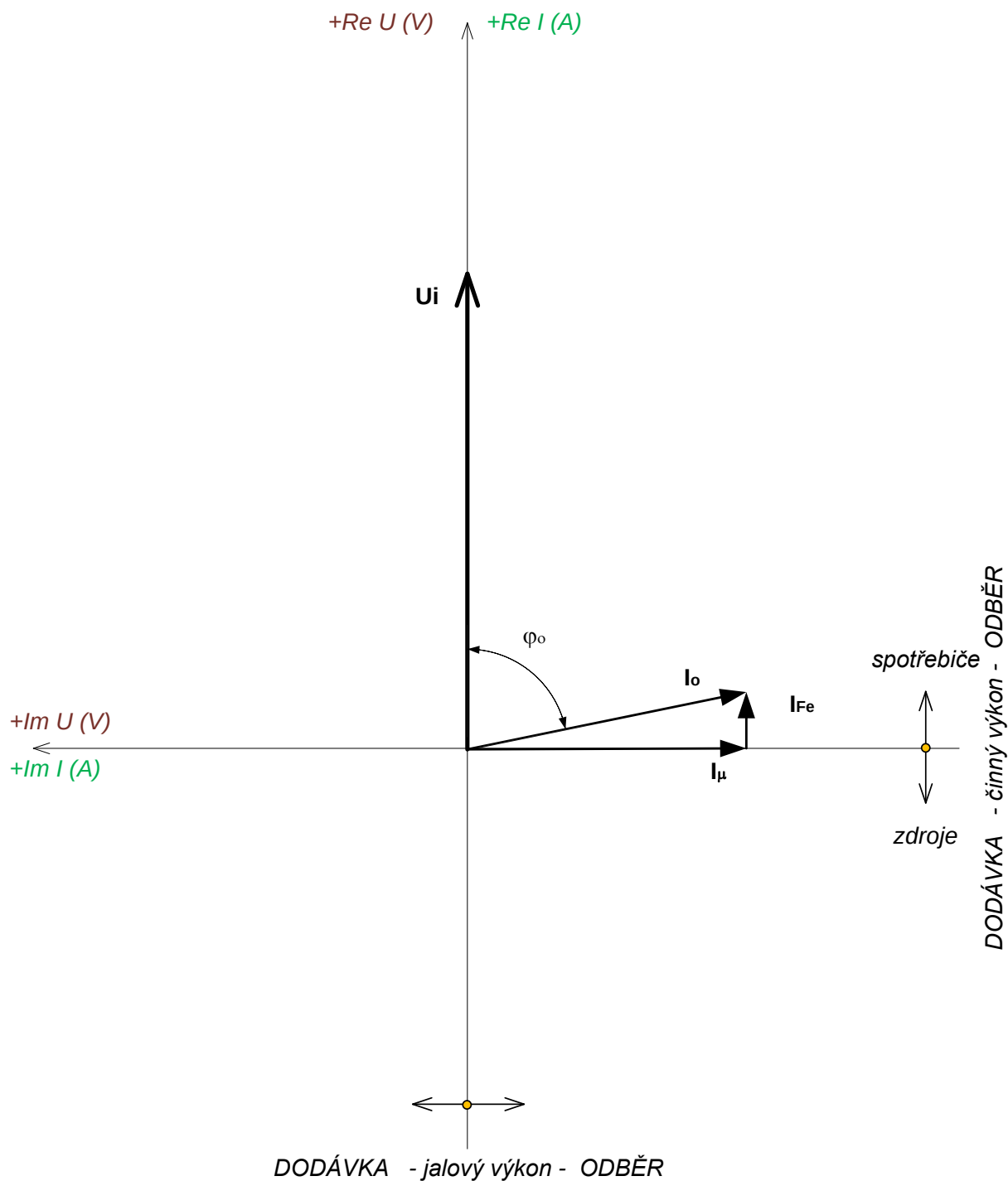
4.2 Složky proudu naprázdno

Proud naprázdno I_0 je proud primárním vinutím, pokud je sekundární vinutí nezatížené. Pak je tento proud dán prvky příčné větve.

Tento proud I_0 má složky

- I_μ jalový induktivní proud - magnetizační proud
- I_{Fe} činný proud – ztráty v magnetickém obvodu

Proud I_{Fe} procházející odporem R_{Fe} je ve fázi s napětím U_i . Proud I_μ procházející magnetizační indukčností L_μ , resp. reaktancí jX_μ , je za napětím U_i opožděn o 90° . Po zakreslení obou složek můžeme provést jejich vektorový součet a obdržíme tím celkový proud naprázdno I_0 .



Obr. 4-2 Indukované napětí a složky proudu naprázdno.

Můžeme shrnout, že proud naprázdno je s velmi malým účínkem, tj. má převážně jalový charakter. Činí obvykle (1-10)% proudu jmenovitého I_n .

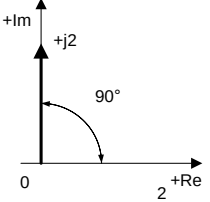
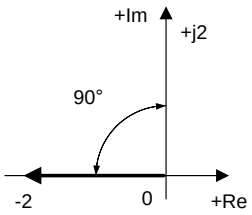
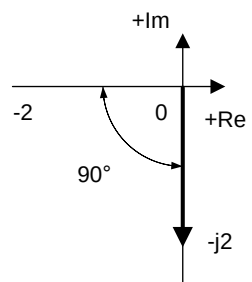
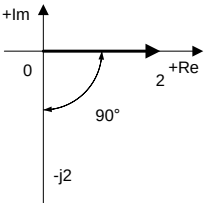
4.3 Úbytky napětí na primáru

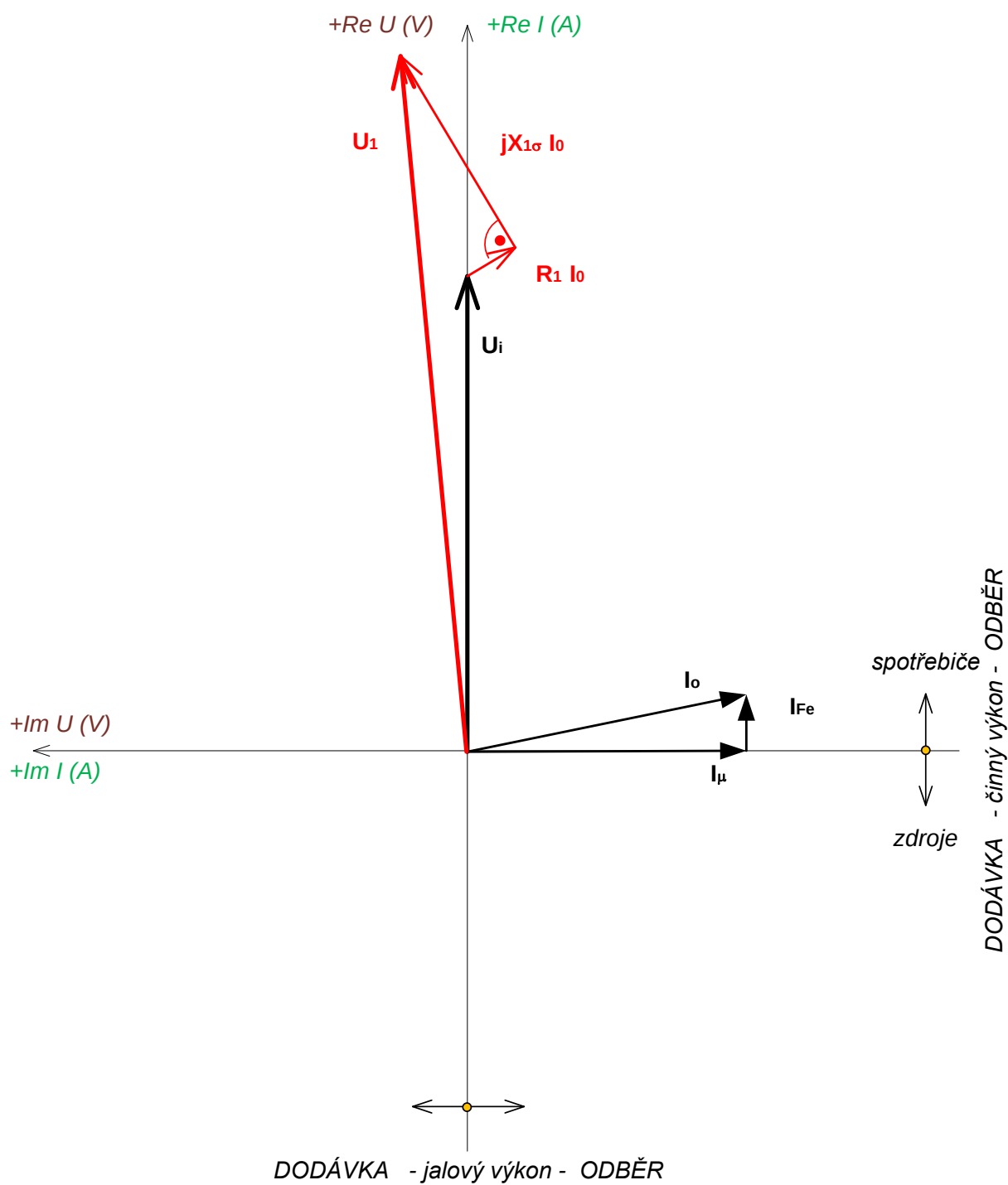
Tento proud naprázdno způsobuje velmi malé úbytky na odporu vinutí primáru R_1 a rozptylové indukčnosti primáru $L_{1\sigma}$, resp. reaktanci $jX_{1\sigma}$.

4 Fázorový diagram transformátoru

Úbytek napětí na odporu R_1 je ve fázi s proudem, který jej způsobuje, tj. proudem I_o . Úbytek na rozptylové reaktanci $jX_{1\sigma}$ je však pootočen o 90° vlevo.

Příkladem může být násobení komplexním číslem $0+j1$, tj. imaginárním číslem j . Pokud vektor vynásobíme tímto číslem, změní se jeho směr o 90° v kladném smyslu (tj. proti směru hodinových ručiček). Vektor necht' je $2+j0$.

vektor	Komplexní násobitel	výsledek	Grafické znázornění
$2+j0$	j	$0+j2$	
$0+j2$	j	$-2+j0$	
$-2+j0$	j	$0-j2$	
$0-j2$	j	$2+j0$	

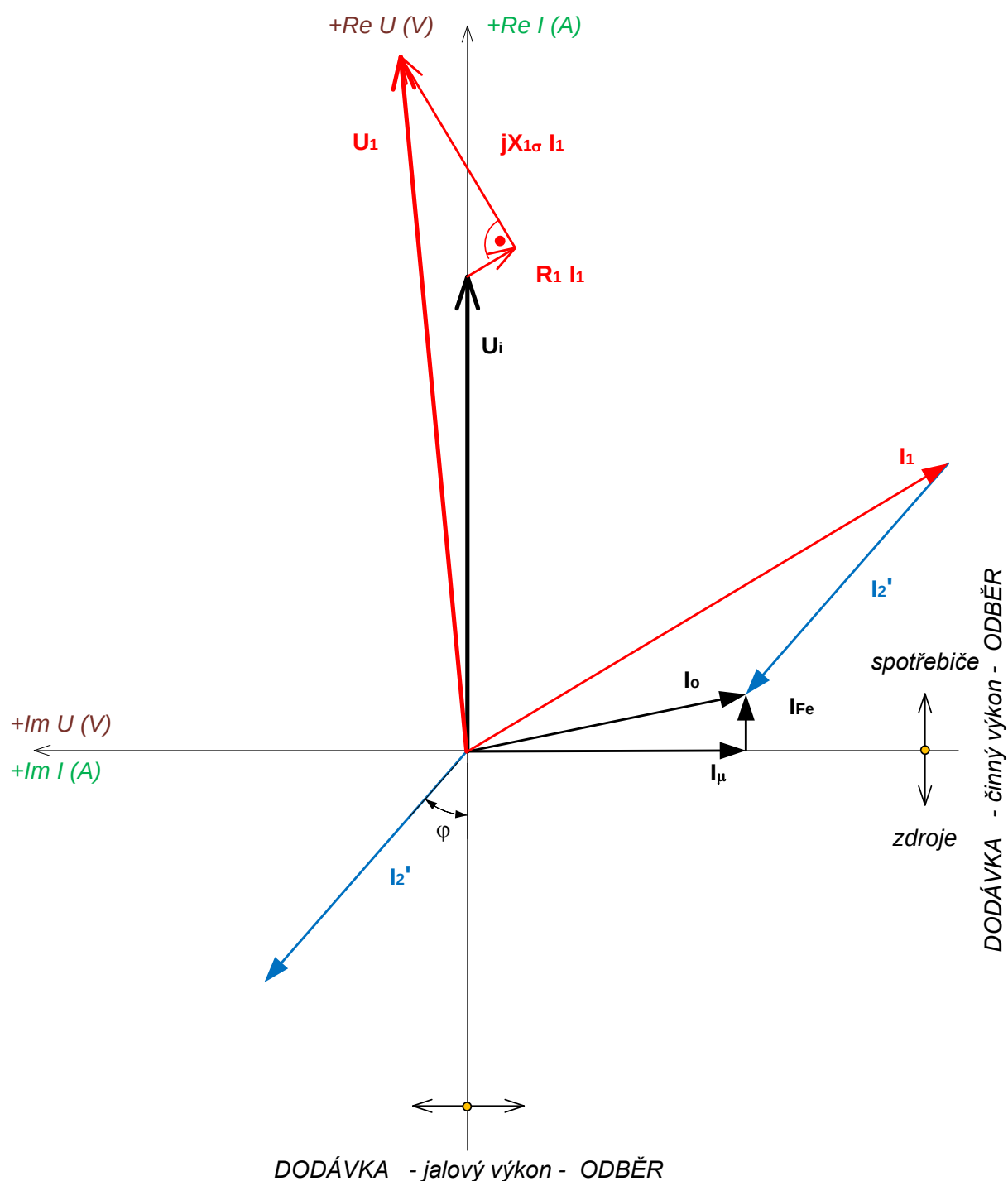


Obr. 4-3 Úbytky napětí na primáru vlivem proudu naprázdno.

Můžeme proto shrnout, že (vnitřní) indukované napětí U_i je nižší než napájecí napětí U_1 a současně je poněkud pootočeno.

4.4 Zatěžovací proud I_2 a proud primární I_1

Nejčastějším druhem zatížení transformátorů je zátěž typu R-L. Ve smyslu zavedeného spotřebičového systému proto tento sekundární proud I_2 bude umístěn obecně ve III. kvadrantu. Pokud oba proudy I_0 a I_2 vektorově sečteme, obdržíme proud primární I_1 .



Obr. 4-4 Proud sekundárního vinutí, které napájí zátěž typu R-L.

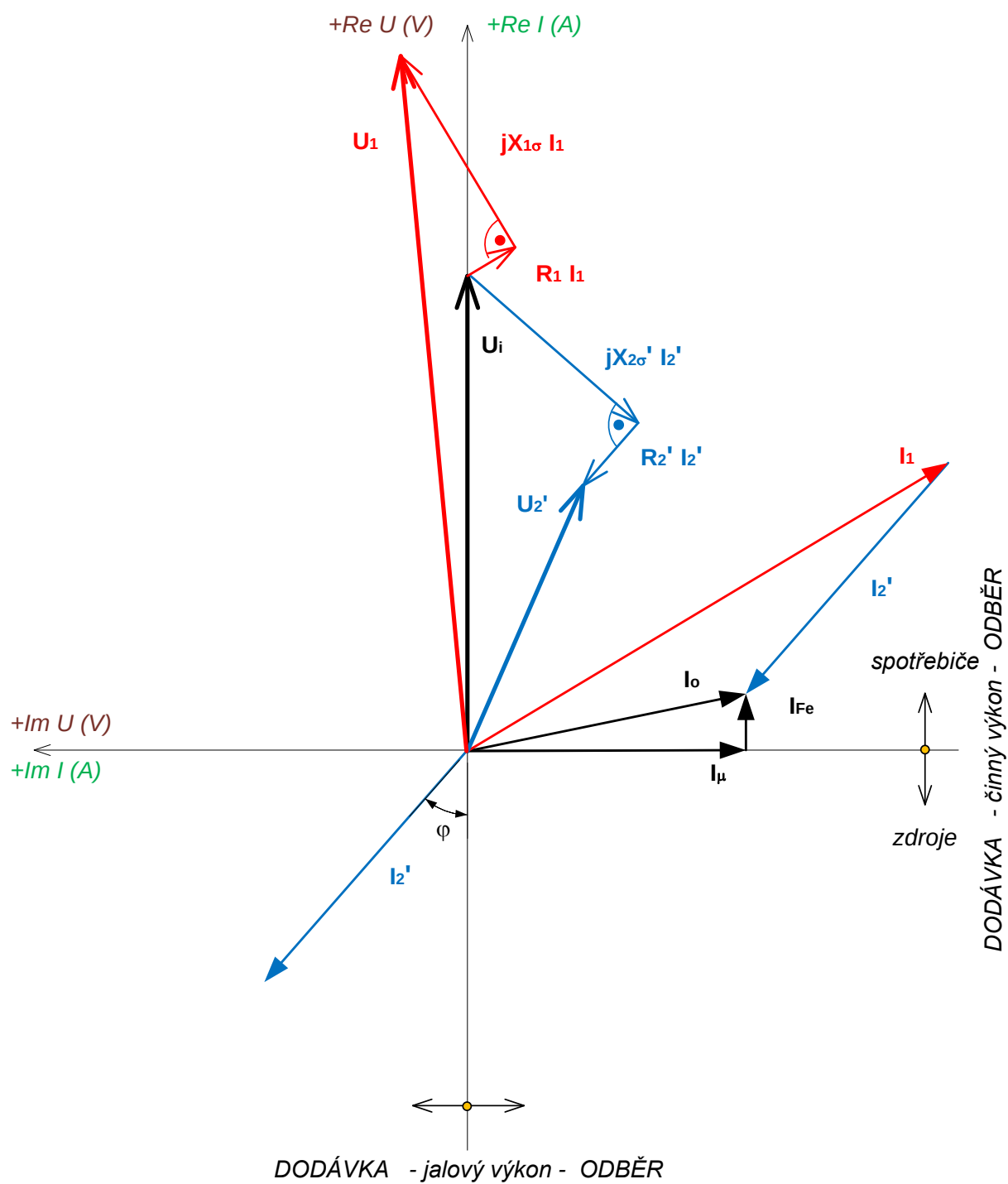
Tento proud I_1 je v prvním kvadrantu a má taktéž R-L charakter, ovšem nikoliv charakter zdroje, ale zátěže - spotřebiče.

4.5 Úbytky napětí na sekundáru

Obdobně jako na primárních podélných prvcích primáru, vznikají úbytky napětí také na podélných prvcích náhradního schéma sekundáru.

Na odporu vinutí sekundáru přepočteného na primární stranu vniká úbytek napětí $R_2' I_2'$ a na rozptylové reaktaci sekundáru přepočtené na stranu primární vzniká úbytek $jX_{2\sigma}' I_2'$, který je ovšem opět natočen o 90° proti směru hodinových ručiček vzhledem k úbytku na odporu R_2' .

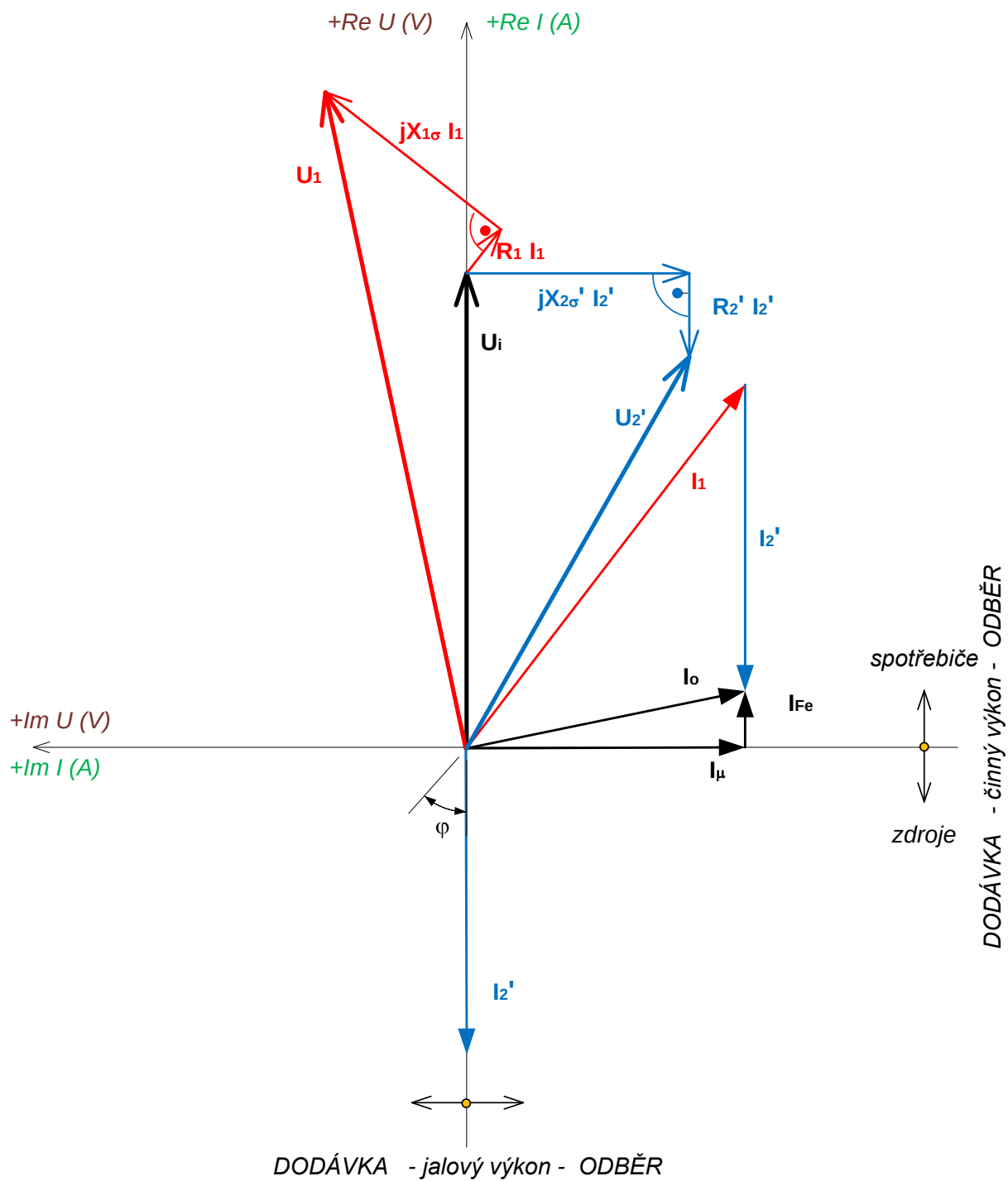
4 Fázorový diagram transformátoru



Obr. 4-5 Úbytky sekundárního vinutí pro R-L zátěž.

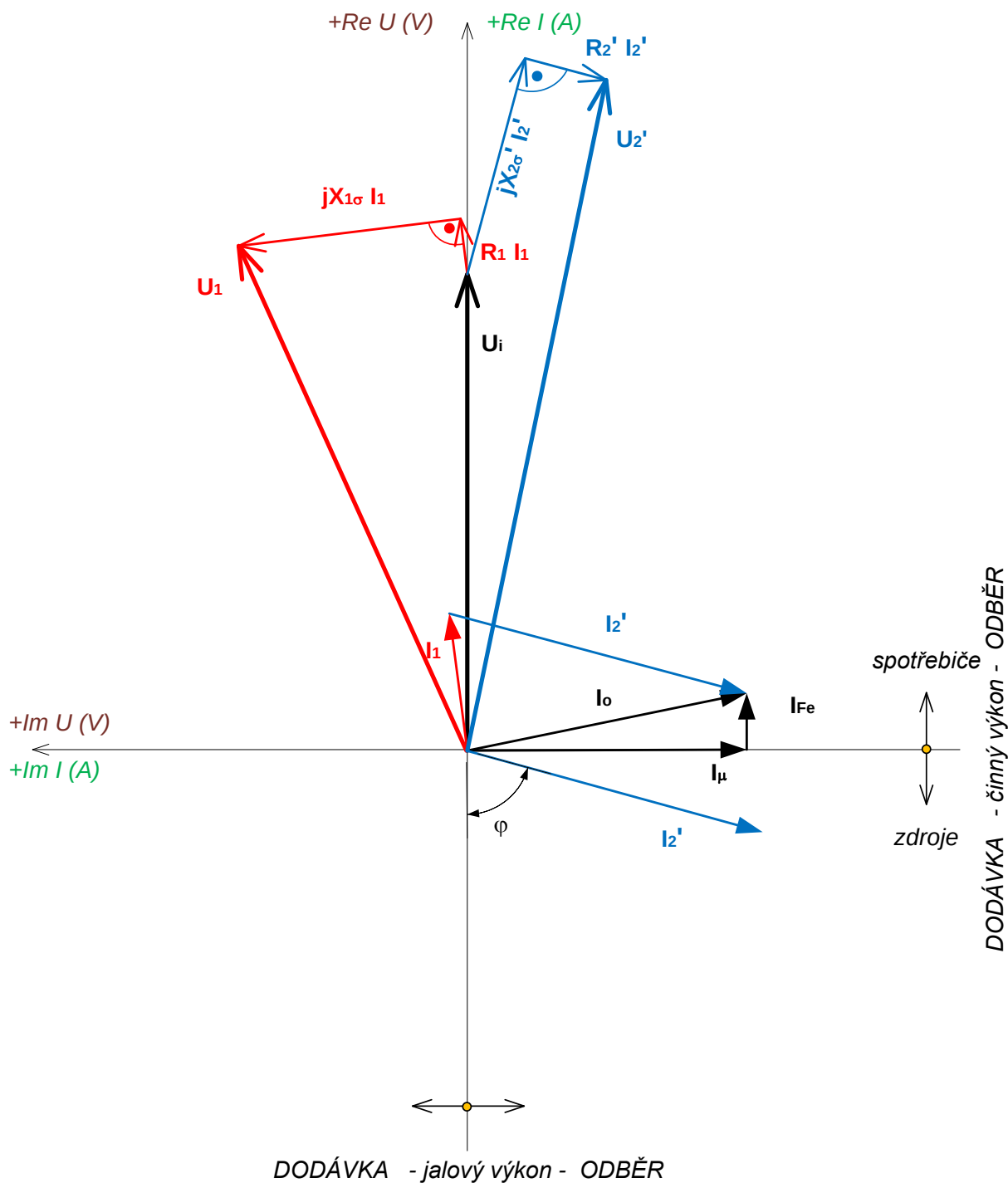
Pokud bude zátěž čistě odporová, bude mít proud I_2 polohu v reálné ose $-\text{Re}$. Natočí se však i všechny úbytky.

4 Fázorový diagram transformátoru



Obr. 4-6 Sekundární vinutí napájí zátěž typu R.

4 Fázorový diagram transformátoru



Obr. 4-7 Sekundární vinutí napájí zátěž typu R-C.

Ve všech třech výše uvedených případech je sekundární proud porovnatelný (svojí velikostí, nikoliv fází – natočením) s proudem naprázdno, tj. transformátor je tak málo zatížen, že je „téměř“ v chodu naprázdno.

I tak je však patrné, že např. silně kapacitní zatížení již malým proudem I_2' může způsobit nárůst napětí na sekundáru a pokud je tento proud větší, tak může způsobit i nárůst napětí na primáru, tj. v napájecí síti. To může být nebezpečné z hlediska napěťového přetížení připojených spotřebičů. Proud I_1 již začíná pak mít kapacitní charakter odběru.



Otázky k tématu:

- *Jak velký je v porovnání se jmenovitým proudem transformátoru jeho proud naprázdno?*
- *Je nutné pro oddělovací transformátor (230/230V) používat při kreslení fázorového diagramu sekundární veličiny přepočítané na stranu primární?*
- *Je úbytek napětí na primárních prvcích vyšší pro stav naprázdno nebo pro stav zatížení?*
- *Kde bude umístěn sekundární proud, pokud bude transformátor napájet pouze kompenzační kondenzátory?*
- *Jak se projeví na poloze sekundárního napětí a proudu hodinové číslo transformátoru?*



Správné odpovědi

- *Jak velký je v porovnání se jmenovitým proudem transformátoru jeho proud naprázdno?*

Obvykle je to (1-10)% I_n .

- *Je nutné pro oddělovací transformátor (230/230V) používat při kreslení fázorového diagramu sekundární veličiny přepočítané na stranu primární?*

Není to nutné, protože transformátor má převod blízký jedné a fázory budou podobné velikosti.

- *Je úbytek napětí na primárních prvcích vyšší pro stav naprázdno nebo pro stav zatížení?*

Pro stav se zatížením je úbytek vyšší.

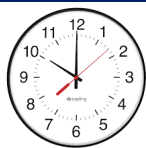
- *Kde bude umístěn sekundární proud, pokud bude transformátor napájet pouze kompenzační kondenzátory?*

Proud I_2 bude položen v kladné imaginární ose. Činné ztráty lze obvykle ve vybíjecích odporech zanedbat.

- *Jak se projeví na poloze sekundárního napětí a proudu hodinové číslo transformátoru?*

Hodinové číslo se neprojevuje. Náhradní schéma je totiž vztaženo na jednu fázi, a proto i fázorový diagram platí pro parametry jedné fáze, tj jednoho vinutí. Hodinové číslo je předmětem spojení vinutí až za jeho svorkami.

5 Chod transformátoru naprázdno



Předpokládaný čas: 30 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o spojení vinutí transformátoru naprázdno
- Umět popsat podmínky měření naprázdno
- Vědět, jak se vypočítá poměrný proud naprázdno a jeho složky
- Umět vysvětlit rozdělení ztrát naprázdno v transformátoru

Chodem transformátoru naprázdno se rozumí stav, kdy je sekundární vinutí odpojené od zátěže a primární vinutí napájíme ze střídavého zdroje. Primárním vinutím pak prochází proud I_1 , který je tzv. proud naprázdno I_{10} .

$$I_1 = I_{10} \text{ (A)} \quad (5.1)$$

Tento proud naprázdno je obvykle malý a činí několik procent proudu jmenovitého I_{1n}

$$I_{10} = (0,01 - 0,1) I_{1n} \text{ (A)} \quad (5.2)$$

Často se uvádí jeho hodnota přímo v procentech nebo jako poměrné číslo, tj. část proudu jmenovitého. Pak jej značíme malým písmenem a vypočítá se

$$i_{10} = \frac{I_{10}}{I_{1n}} (-) \quad (5.3)$$

Na sekundárním vinutí máme napětí U_2 , kterému říkáme napětí naprázdno U_{20}

$$U_2 = U_{20} \text{ (V)} \quad (5.4)$$

a které je vyšší než napětí jmenovité U_{2n} . Zákazník často stanovuje výrobci maximální napětí naprázdno $U_{20\max}$, aby nedošlo při odlehčení transformátoru ke ztracení životnosti napájeného zařízení. Jmenovité napětí U_{2n} je na svorkách při zatížení jmenovitým proudem a jmenovitým účíníkem a samozřejmě platí také pro jmenovité napájecí napětí U_{1n} .

Protože ze sekundárního vinutí neodebíráme žádný výkon

$$S_2 = m U_{20} I_2 = m U_{20} 0 = 0 \text{ (VA)} \quad (5.5)$$

Jedná se o tzv. ne-wattovou zkoušku a veškerý příkon hradí pouze ztráty v transformátoru a zajišťuje jeho magnetizaci jalovým příkonem.

5.1 Spojení vinutí

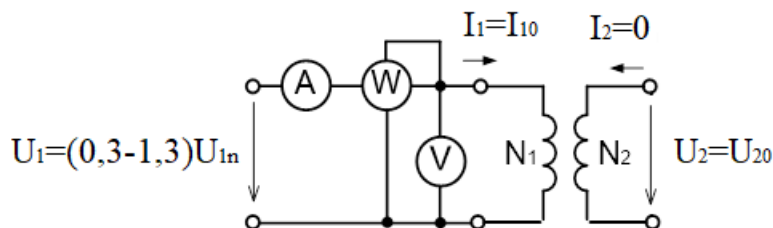
5 Chod transformátoru naprázdno

Transformátor musí mít vinutí spojená stejně, jako je bude mít spojené v provozu. Důvodem je, že v chodu naprázdno měříme např. také převod transformátoru a spojení vinutí má přímý vliv na převod.

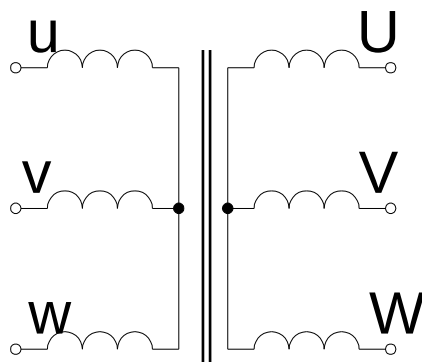
Druhým důvodem je odhalení případné výrobní odchylky nebo dokonce vady, resp. poruchové stavy a jejich detekce ještě na zkušebně výrobního závodu před distribucí výrobku.

Ve stavu naprázdno se pro jmenovité napětí zjišťuje také tvar procházejícího proudu a velikost zapínacího proudu I_{inrush} , který je mnohonásobně vyšší než I_{1n} .

$$I_{inrush} = \text{až } 20 I_{1n} (A) \quad (5.6)$$



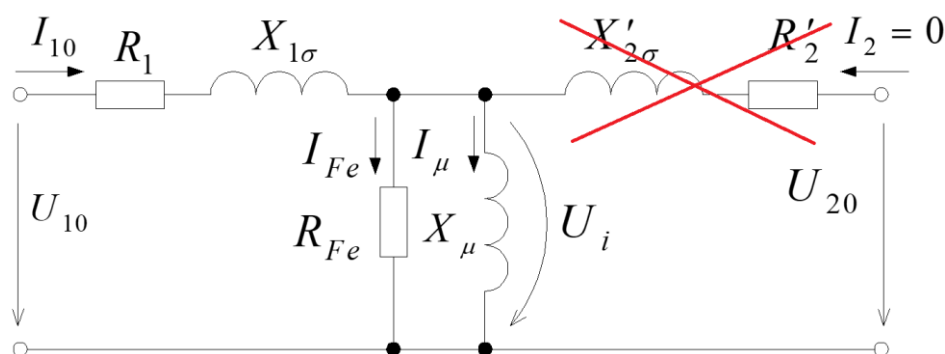
Obr. 5-1 Schéma spojení 1f transformátoru naprázdno.



Obr. 5-2 Schéma spojení 3f transformátoru Yy naprázdno. Nižší napětí je značeno malými písmeny, vyšší napětí velkými písmeny.

5.2 Náhradní schéma

Náhradní schéma ve stavu naprázdno neobsahuje sekundární přepočítané veličiny, protože sekundárním vinutím neprotéká žádný proud. Vzhledem k velikosti odporu vinutí R_1 a odporu nahrazujícího ztráty v magnetickém obvodu R_{Fe} jsou ztráty v primárním vinutí zanedbatelné. Podobně i magnetizační reaktance jX_μ je o několik řádů vyšší než rozptylová reaktance jX_σ . Proto má proud naprázdno složku činnou I_{Fe} (ztráty v magnetickém obvodu) a složku jalovou – magnetizační proud I_μ .



Obr. 5-3 Náhradní schéma transformátoru naprázdno.

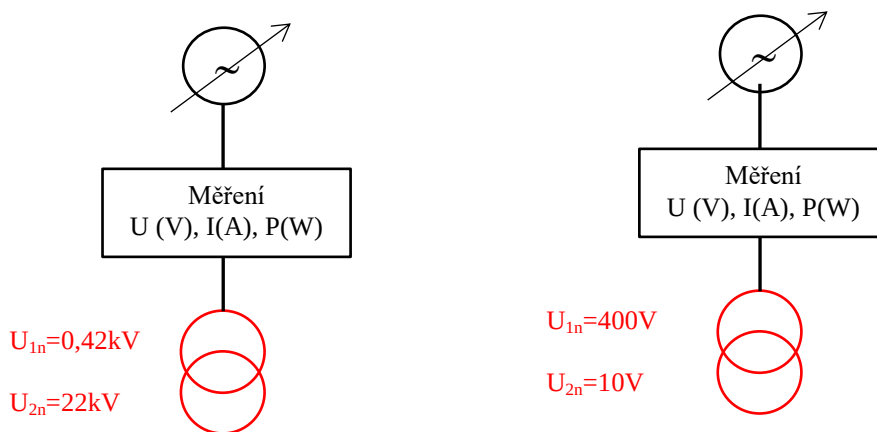
5.3 Měření naprázdno

Měření naprázdno provádíme při napájení proměnným napětím, zpravidla v rozsahu (30-130)% U_n . Zvláštní pozornost věnujeme proměření jmenovitého bodu. Měříme samozřejmě napětí, proud a činný příkon. Všechny veličiny měříme v každé fázi.

Zpravidla transformátor připojíme na regulovatelný zdroj harmonického napětí při minimální hodnotě nastaveného napětí, abychom zamezili velkému zapínacímu proudu I_{inrush} , který by vznikl při zapnutí na jmenovité (nebo dokonce vyšší) napětí.

Pak napětí plynule zvýšíme na maximální hodnotu a vlastní měření provádíme pro snižující se hodnoty. Nicméně měření pro zvyšující se napětí je též možné.

Měření naprázdno provádíme ze strany toho vinutí, kde je to snáze proveditelné. Většinou je to strana nižšího napětí.



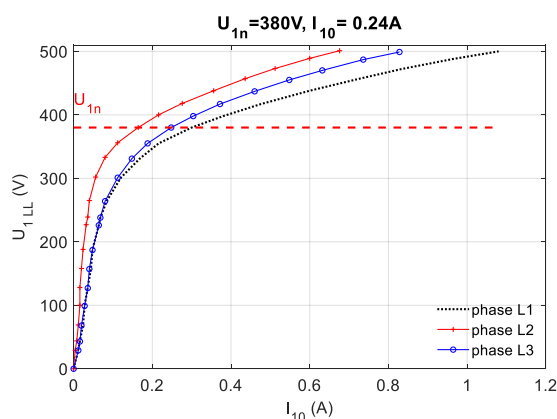
Obr. 5-4 Volba vinutí pro měření naprázdno

Např. pro transformátor 22/0,42 kV to provedeme ze strany NN. Nepotřebujeme tak zdroj VN, měřicí přístroje VN a je to i bezpečnější.

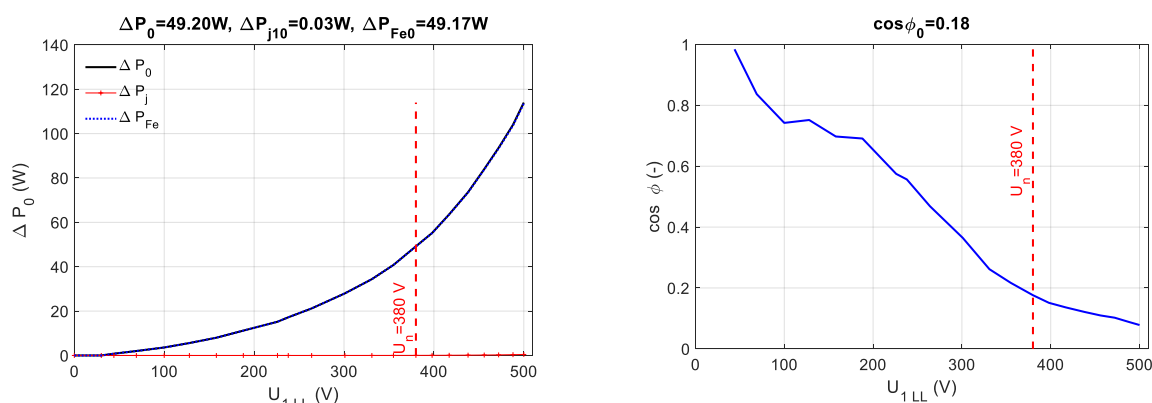
Naopak např. pro transformátory svářecí, které mají malé sekundární napětí (400/10V) je výhodnější napájet stranu vyššího napětí. Zpravidla totiž nemáme jemně regulovatelný zdroj již pro malé hodnoty napětí.

5 Chod transformátoru naprázdno

V každém případě je potřeba do protokolu o měření jednoznačně uvést, které vinutí bylo napájeno. Pro potřeby měření je tato strana označena indexy „1“. Pozor - v provozu může být indexy „1“ označeno vinutí jiné!



Obr. 5-5 Magnetizační charakteristika transformátoru naprázdno.



Obr. 5-6 Ztráty a účinník transformátoru naprázdno.

5.4 Určení proudu naprázdno a jeho složky

Pro 3f transformátory s jádrovou konstrukcí magnetického obvodu je magnetizační proud prostředního sloupku výrazně nižší, než sloupků krajních. Je to způsobeno rozdílnou délkou siločáry. Pro jmenovité napětí za magnetizační proud považujeme střední hodnotu vypočítanou ze všech 3f.

Proud naprázdno I₁₀ má činnou složku I_{Fe} a jalovou složku I_μ.

$$I_{10} = I_{Fe} + I_{\mu} (A) \quad (5.7)$$

Složky lze určit jednoduše pomocí účinníku

$$I_{Fe} = I_{10} \cos \varphi_0 (A) \quad (5.8)$$

a

$$I_{\mu} = I_{10} \sin \varphi_0 \text{ (A)} \quad (5.9)$$

Jak je vidět z průběhu účinníku, při malém sycení magnetického obvodu je proud převážně činný, pro vyšší napětí se magnetický obvod sytí stále více a narůstá jalový příkon, tj. účinník klesá. U velkých transformátorů může být pro U_{1n} i menší než 0,1.



Otázky k tématu:

- Jak provedeme měření naprázdno transformátoru?
- Vypočítejte pro jmenovité napětí poměrnou hodnotu proudu naprázdno pro 3f transformátor $f=50\text{Hz}$, $S=6300\text{VA}$, $U=380/42\text{V}$, $I=9,87/87\text{A}$, jehož charakteristiky naprázdno byly jako příklad uvedeny na obrázcích.
- Vypočítejte magnetizační proud I_{μ} (A) pro jmenovité napětí výše uvedeného transformátoru.
- Vypočítejte činnou složku proudu naprázdno I_{Fe} (A) pro jmenovité napětí výše uvedeného transformátoru.



Správné odpovědi

- Jak provedeme měření naprázdno transformátoru?

Transformátor zapínáme na snížené napětí, abychom chránili přístroje nastavené na malé proudy naprázdno I_{10} před velkým zapínacím proudem I_{inrush} , který je až $20 \times I_{1n}$. Pak plynule zvýšíme napětí na $1,30 \times U_{1n}$ a vlastní měření provedeme pro snižující se hodnoty napětí do $0,3 U_{1n}$.

- Vypočítejte pro jmenovité napětí poměrnou hodnotu proudu naprázdno pro 3f transformátor $f=50\text{Hz}$, $S=6300\text{VA}$, $U=380/42\text{V}$, $I=9,87/87\text{A}$, jehož charakteristiky byly jako příklad uvedeny na obrázcích.

Ze zadání a grafů naprázdno lze zjistit následující údaje.

$I_{1n} = 9,87\text{A}$, $I_{10} = 0,24\text{A}$ pro $U_{1n} = 380\text{V}$

$$i_{10} = \frac{I_{10}}{I_{1n}} = \frac{0,24}{9,87} = 0,024 \text{ (-)} \quad (5.10)$$

- Vypočítejte magnetizační proud I_{μ} (A) pro jmenovité napětí výše uvedeného transformátoru.

Ze zadání a grafů naprázdno lze zjistit následující údaje.

$I_{10} = 0,24\text{A}$ pro $U_{1n} = 380\text{V}$, účinník pro $U_{1n} = 380\text{V}$ je $\cos \varphi = 0,18$.

$$I_{\mu} = I_{10} \sin \varphi_0 \text{ (A)} = 0,24 \cdot 0,983 = 0,236 \text{ (A)} \quad (5.11)$$

- Vypočítejte činnou složku proudu naprázdno I_{Fe} (A) pro jmenovité napětí výše uvedeného transformátoru

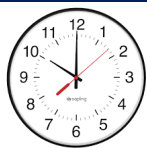
Ze zadání a grafů naprázdno lze zjistit následující údaje.

$I_{10} = 0,24\text{A}$ pro $U_{1n} = 380\text{V}$, účinník pro $U_{1n} = 380\text{V}$ je $\cos \varphi = 0,18$.

5 Chod transformátoru naprázdno

$$I_{Fe} = I_{10} \cos \varphi_0 = 0,24 \cdot 0,18 = 0,043 \text{ (A)} \quad (5.12)$$

6 Chod transformátoru nakrátko



Předpokládaný čas: 30 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o rozdílu mezi chodem nakrátko a zkratem transformátoru
- Umět popsat definici a měření napětí nakrátko
- Vědět, jak se vypočítají ztráty ve vinutí sekundáru, aniž bychom měřili proud sekundárním vinutím
- Umět vysvětlit rovnost poměrného napětí nakrátko a poměrné impedance nakrátko transformátorů

Principem chodu nakrátko je sekundární vinutí spojené vodiči dostatečného průřezu dokrátka a primární vinutí napájíme sníženým napětím tak, abychom ve vinutích nepřekročily jmenovité proudy.

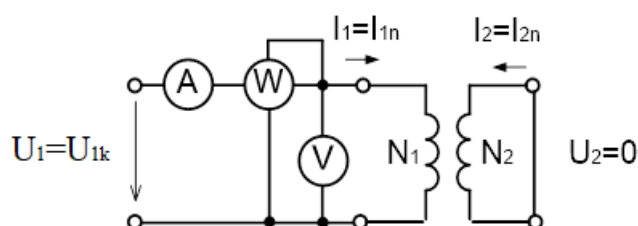
Chod nakrátko proto transformátor vydrží trvale, pokud má zajištěno odpovídající chlazení.

Zásadním rozdílem od zkratu je velikost napájecího napětí. Při zkratu je napájecí napětí jmenovité a vzniknou velké proudy, které transformátor ohrožují. Proto jej musíme ihned vypnout, nejlépe již během několika prvních period zkratového proudu.

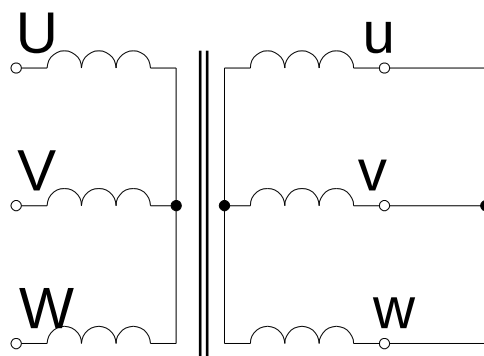
6.1 Spojení vinutí

Transformátor musí mít vinutí spojená stejně, jako je bude mít spojené v provozu.

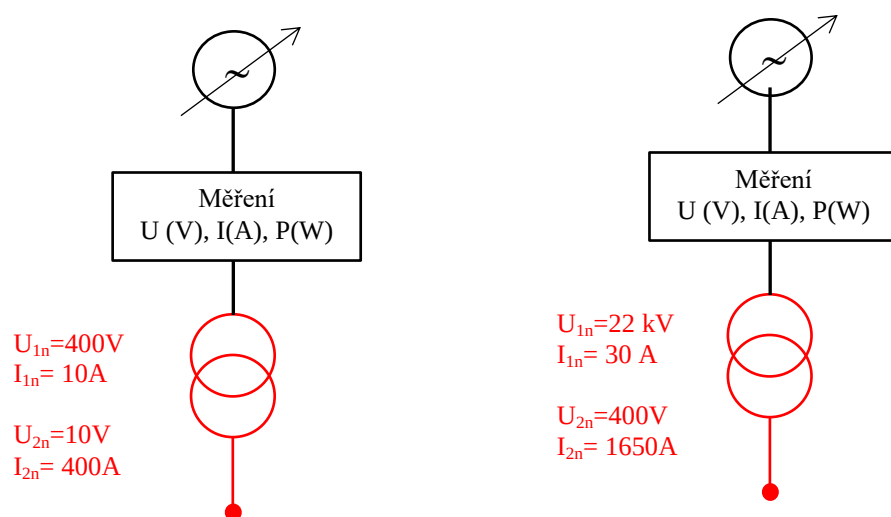
Měření nakrátko provádíme z té strany vinutí, z které je to jednodušší. Zpravidla to bývá strana vyššího napětí, protože má nižší proudy a nepotřebujeme tak regulovatelný zdroj na velký proud. Současně se tím snižují nároky na přesnost jeho regulace napětí.



Obr. 6-1 Spojení vinutí 1f transformátoru nakrátko.

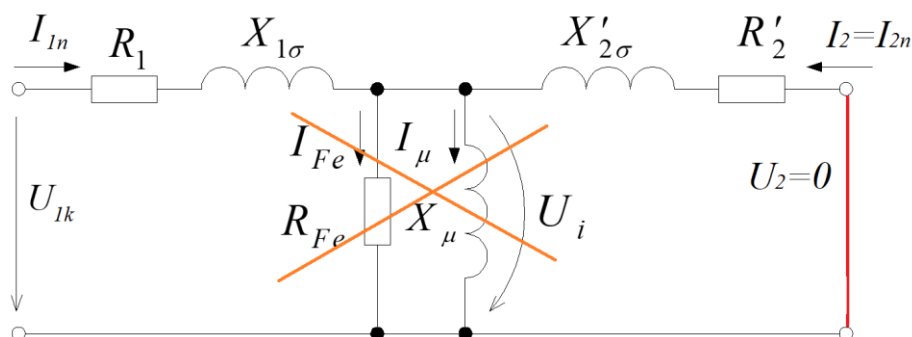


Obr. 6-2 Spojení vinutí 3f transformátoru Yy nakrátko. Strana vyššího napětí má svorky značené velkými písmeny, strana nižšího napětí malými písmeny.



Obr. 6-3 Volba vinutí pro měření nakrátko

6.2 Náhradní schéma transformátoru nakrátko

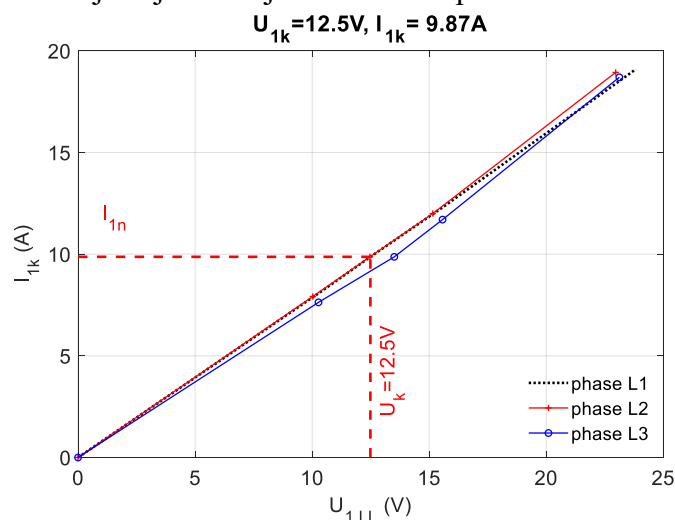


Obr. 6-4 Náhradní schéma pro chod nakrátko.

6.3 Charakteristika nakrátko

Charakteristika VA nakrátko je přímková, protože hlavní tok v jádře od primárního proudu I_1 je demagnetován velkými (jmenovitými) sekundárními proudy I_2 . Nesymetrie fází (viz chod naprázdno) se v tomto případě neprojevuje, protože malé rozdíly (magnetizační proudy) jsou zcela překryty mnohonásobně vyššími jmenovitými proudy.

Z charakteristiky nakrátko je nejdůležitější určit tzv. napětí nakrátko.



Obr. 6-5 VA charakteristika transformátoru nakrátko.

Napětí nakrátko je takové napětí, které ve stavu nakrátko vyvolá ve vinutích (v obou, v primárním i sekundárním) jmenovité proudy.

Vzhledem k omezeným možnostem regulace napájecího zdroje je však zpravidla obtížné toto napětí přesně nastavit a změřit. Proto se určuje výpočtem z přímkové charakteristiky nakrátko.

$$U_k = \frac{I_n}{I'_k} U'_k (V) \quad (6.1)$$

Na charakteristice nakrátko si vybereme bod o změřených souřadnicích U'_k a I'_k , který se moc neodchyluje od přímkové charakteristiky průběhu.

Výše uvedený vztah lze slovně interpretovat takto: „Napětí nakrátko je tolikrát jiné než naměřené napětí U'_k , kolikrát je jiný naměřený proud bodu I'_k než je jmenovitý proud I_n .“

Je potřeba uvážit, jak bylo měření prováděno a zda je napětí U'_k skutečně sdružené napájecí napětí (v případě 3f transformátorů, jinak je to samozřejmě fázová hodnota pro 1f transformátory). Pokud tomu tak není, je potřeba je na sdruženou hodnotu přepočítat.

Takto stanovené napětí nakrátko přepočítáme na poměrnou hodnotu podle vztahu

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} (-) \quad (6.2)$$

Zde je potřeba věnovat pozornost, aby byla obě napětí buď fázovou hodnotou (v případě 1f transformátorů) nebo sdruženou hodnotou (v případě 3f transformátorů).

Zajímavou skutečností je rovnost poměrné impedance nakrátko a napětí nakrátko

$$u_k = z_k (-) \quad (6.3)$$

Nenastává ani kolize jednotek, protože se jedná o bezrozměrné veličiny.

Tento zajímavý a užitečný vztah lze snadno odvodit, když rozšíříme čítele i jmenovatele jedničkou, a to ve tvaru

$$1 = \frac{\frac{1}{I_k}}{\frac{1}{I_n}} \quad (6.4)$$

Zde je třeba si uvědomit, že napětí nakrátko je definováno pro jmenovitý proud a proto platí

$$1 = \frac{\frac{1}{I_k}}{\frac{1}{I_n}} = \frac{\frac{U_k}{I_k}}{\frac{U_n}{I_n}} \quad (6.5)$$

Dosazením do vztahu pro poměrnou hodnotu napětí nakrátko dostaneme

$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{U_k}{U_n} \frac{\frac{1}{I_k}}{\frac{1}{I_n}} = \frac{\frac{U_k}{I_k}}{\frac{U_n}{I_n}} = \frac{Z_k}{Z_n} = z_k (-) \quad (6.6)$$

Podle nových norem EU se pracuje již pouze s poměrnou impedancí nakrátko, nikoliv s napětím nakrátko.

Velikost impedance (=napětí) nakrátko určuje tvrdost transformátoru jakožto tvrdost zdroje napětí. Impedance nakrátko bývá

- (0,04-0,12) U_n pro tvrdé napájecí transformátory a autotransformátory
- (0,1-0,3) U_n pro transformátory pro výkonovou elektroniku (např. lokomotivní Tr)
- (0,3-0,8) U_n pro svařovací transformátory (chovají se spíše jako zdroje proudu)
- (0,8-1) U_n pro transformátory zkratuvzdorné (např. nesmí při zkratu vzniknout požár)

Extrapolací může vypočítat proud zkratový, který bude procházet v okamžiku vzniku zkratu při jmenovitém napětí

$$I_{kn} = \frac{U_n}{U_k} I_n \text{ (A)} \quad (6.7)$$

Výše uvedený vztah platí za předpokladu, že magnetický obvod nebude nasycen ani při napájení jmenovitým napětím v chodu nakrátko.

6.4 Ztráty nakrátko

Ztráty transformátoru v chodu nakrátko jsou ztráty ve vinutí ΔP_j a ztráty dodatečné ΔP_d .

$$\Delta P_k = \Delta P_j + \Delta P_d \text{ (W)} \quad (6.8)$$

Ztráty dodatečné, přídatné, vznikají vlivem skinefektu ve vinutí, ve stahovacích a konstrukčních částech transformátoru. Ztráty ve vinutí jsou tzv. Joulovy ztráty a vznikají v primárním i sekundárním vinutí.

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} \text{ (W)} \quad (6.9)$$

V případě jednofázového transformátoru jsou ztráty ve vinutí

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (6.10)$$

Protože je praktické mít na sekundáru jen propojení dokrátka, bez jakéhokoliv (i jen klešťového) ampérmetru, můžeme pro výpočet ztrát v sekundárním vinutí použít převod transformátoru ve tvaru

$$k = \frac{I_2}{I_1} (-) \quad (6.11)$$

a to dosadíme

$$\Delta P_j = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = R_1 I_1^2 + R_2 k^2 I_1^2 = I_1^2 (R_1 + R_2 k^2) = I_1^2 (R_1 + R_2') \quad (6.12)$$

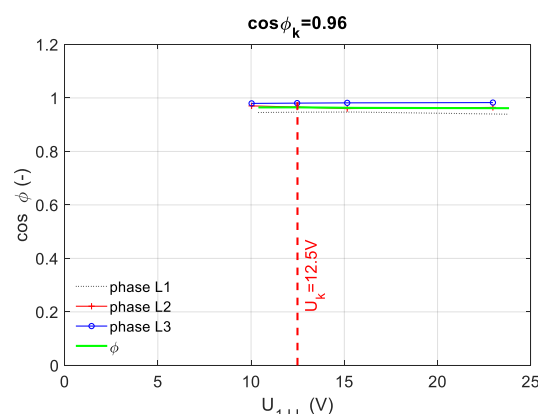
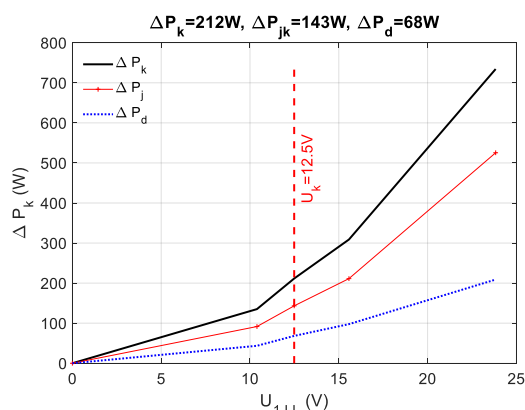
V případě trojfázového transformátoru je doporučeno měřit trojfázovým systémem (3xU, 3xI, 3xP) a pak se počítají součty ztrát v jednotlivých fázích primáru

$$\Delta P_{j1} = R_{1L1} I_{L1}^2 + R_{1L2} I_{L2}^2 + R_{1L3} I_{L3}^2 \text{ (W)} \quad (6.13)$$

a sekundáru

$$\Delta P_{j2} = R_{2L1} k^2 I_{L1}^2 + R_{2L2} k^2 I_{L2}^2 + R_{2L3} k^2 I_{L3}^2 \text{ (W)} \quad (6.14)$$

Pokud provádíme měření nakrátko z jiné strany než měření naprázdno (a zejména měření převodu), je potřeba si uvědomit, zda do výše uvedených vztahů dosazujeme za převod stanovené číslo „k“ nebo jeho převrácenou hodnotu „1/k“.



Obr. 6-6 Ztráty a účinník transformátoru nakrátko.

Charakteristika účinníku se příliš nemění, je konstantní. Nemusí však být u větších transformátorů vyšší než 0,6.



Otázky k tématu:

- Vypočítejte napětí nakrátko $U_k(V)$ pro 3f transformátor $f=50\text{Hz}$, $S=6300\text{VA}$, $U=380/42\text{V}$, $I=9,87/87\text{A}$, jehož charakteristika nakrátko na obrázcích obsahuje změřený bod $5,9\text{V}/7,9\text{A}$.
- Pro napětí nakrátko určené v předchozím bodu vypočítejte jeho poměrnou hodnotu.
- Pro transformátor z prvního bodu vypočítejte zkratový proud pro jmenovité napětí.



Správné odpovědi

- Vypočítejte napětí nakrátko $U_k(V)$ pro 3f transformátor $f=50\text{Hz}$, $S=6300\text{VA}$, $U=380/42\text{V}$, $I=9,87/87\text{A}$, jehož charakteristika nakrátko na obrázcích obsahuje změřený bod $5,9\text{V}/7,9\text{A}$.

Použijeme vztah

$$U_{kf} = \frac{I_n}{I'_k} U'_k = \frac{9,87}{7,9} 5,9 = 7,37 \text{ (V)} \quad (6.15)$$

Protože však napětí U'_k bylo změřeno jako fázové, je i napětí nakrátko U_k fázová hodnota. Sdruženou hodnotu určíme snadno

$$U_k = \sqrt{3} U_{kf} = \sqrt{3} \cdot 7,37 = 12,75 \text{ (V)} \quad (6.16)$$

- Pro napětí nakrátko určené v předchozím bodu vypočítejte jeho poměrnou hodnotu.

Dosadíme do vztahu

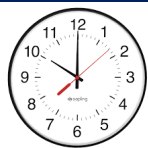
$$u_k = \frac{U_k}{U_n} = \frac{12,75}{380} = 0,0336(-) \quad (6.17)$$

- Pro transformátor z prvního bodu vypočítejte zkratový proud pro jmenovité napětí.

Dosadíme do vztahu

$$I_{kn} = \frac{U_n}{U_k} I_n = \frac{380}{12,75} 9,87 = 294 \text{ (A)} \quad (6.18)$$

7 Paralelní chod transformátorů



Předpokládaný čas: 30 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o výhodách a nevýhodách napájení zátěže jedním a více transformátory
- Umět popsat podmínky paralelního chodu
- Vědět, jak se odhadne velikost vyrovnávacího proudu při nestejném převodu transformátorů
- Umět vysvětlit rozdělení výkonů při různém napětí nakrátko transformátorů

Transformátory pracují paralelně, když mají primární vinutí napájená ze stejné sítě (např. 22 kV) a jejich sekundární vinutí jsou připojena taktéž společně na síť jiného systému (např. 400V). Napájení zátěže je možné řešit buď použitím

- Jednoho velkého transformátoru
- Několika menších transformátorů, pracujících paralelně
- Rozdělením zátěže na několik částí a každá část má svůj transformátor

Každý z uvedených způsobů má svoje výhody a nevýhody.

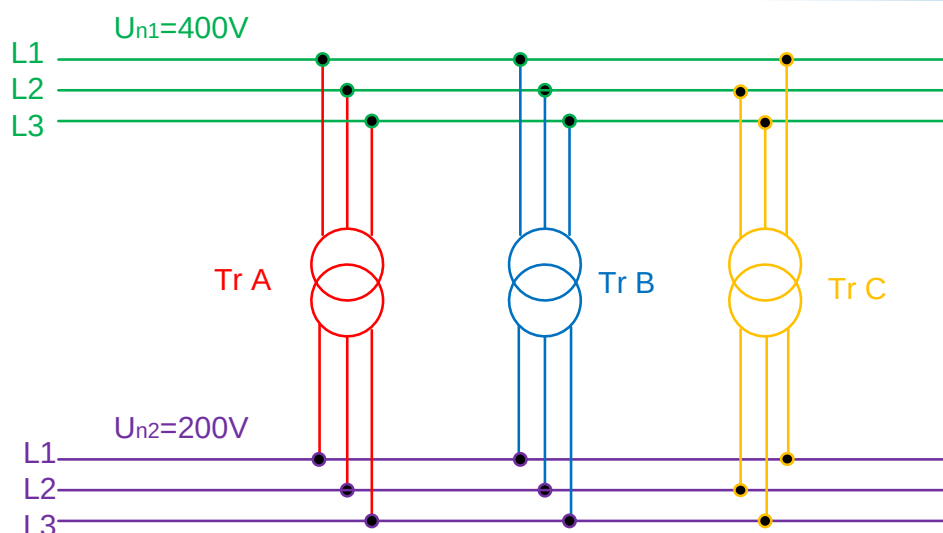
	výhody	nevýhody
Jeden velký transformátor	Levnější Zabírá méně místa než více malých Tr	Menší spolehlivost provozu Jako záloha musí být použit stejný transformátor Méně hospodárný provoz (dPo nezávislé na zatížení)
Paralelní spolupráce Tr	Spolehlivější dodávka energie Při odlehčení lze některé Tr vypnout	Vyšší náklady na propojení Náročnější ochrany a jištění

Aby transformátory mohly pracovat paralelně, musí splňovat následující podmínky.

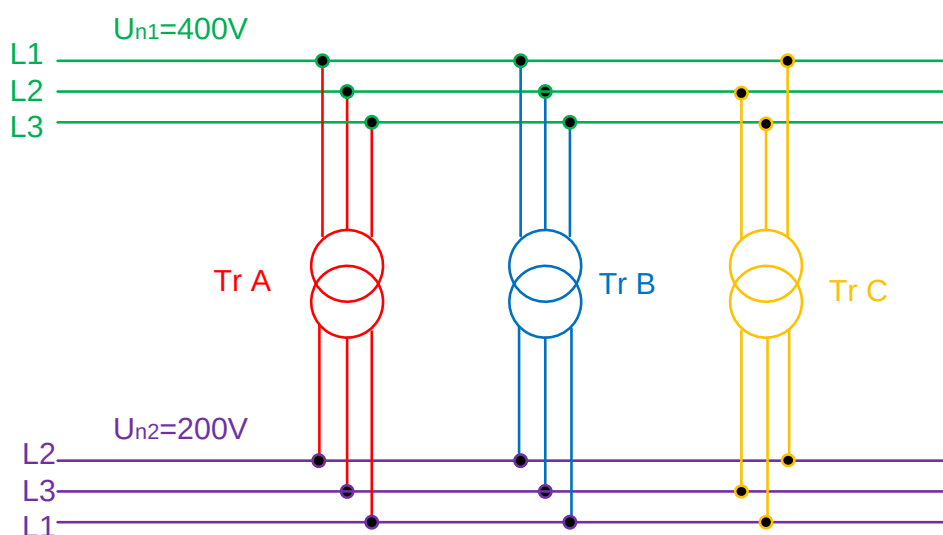
7.1 Stejný sled fází

Transformátory musí mít stejný sled fází na primární straně i na sekundární straně, jinak by vznikl mezifázový zkrat. Jinak řečeno – motory se musejí točit na stejnou stranu při definovaném způsobu připojení a pohledu na volný konec hřídele. Připojují se svorky motoru U-V-W v tomto pořadí na fáze sítě L1-L2-L3.

Kromě stejného sledu fází je vhodné, aby byla zachována i stejná identita fází, tj. fáze L1 napájecí sítě aby byla opět fází L1 napájené zátěže.



Obr. 7-1 Stejný sled fází, stejná identita fází obou sítí.



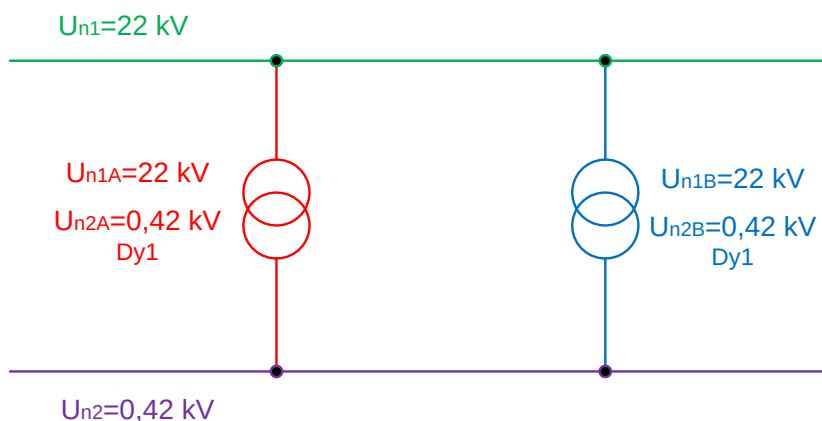
Obr. 7-2 Stejný sled fází a nestejná identita fází obou sítí.

7.2 Stejné hodinové číslo

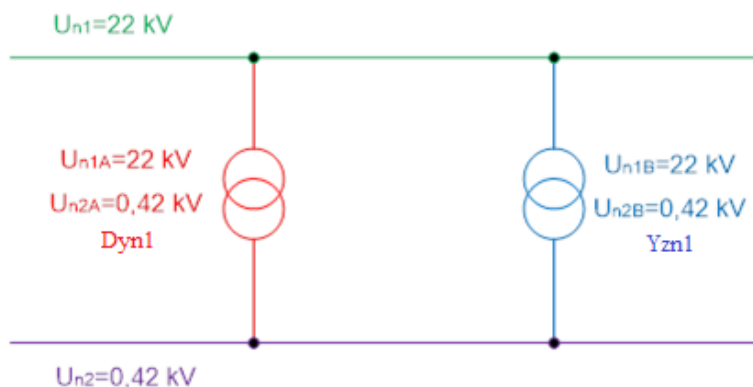
Transformátory s malým napětím nakrátko jsou tvrdými zdroji napětí a musejí mít stejné hodinové číslo. Nejmenší možný rozdíl hodinových čísel (tj. $1h = 30^\circ$) by způsobil nepřípustně vysoké vyrovnávací proudy a znemožnil paralelní provoz transformátorů.

Největší vyrovnávací proud by vznikl při rozdílu hodinových čísel $6h = 180^\circ$, kdy by byl rozdíl napětí roven dvojnásobku jmenovitých fázových napětí.

V některých případech lze vhodným přepojením nebo cyklickou záměnou fází dosáhnout shodného hodinového čísla.



Obr. 7-3 Stejné hodinové číslo Dyn1



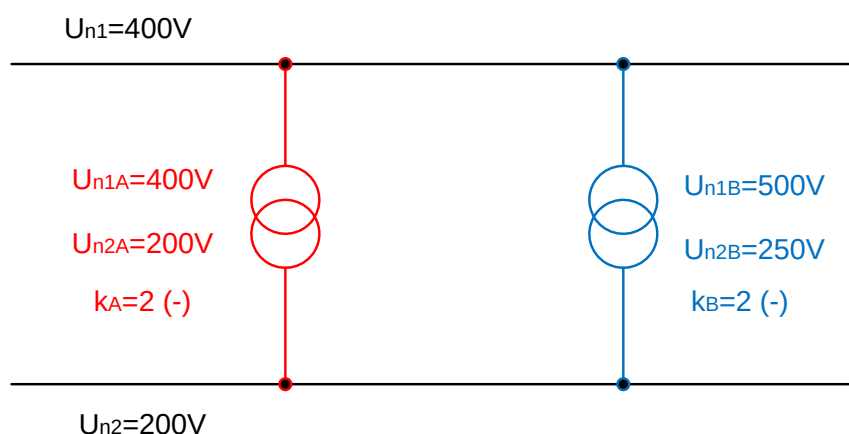
Obr. 7-4 Stejné hodinové číslo Dyn1 a Yzn1

Hodinové číslo s označením „n“ vyjadřuje vyvedení středního pracovního vodiče nebo nulového vodiče. Jedná se prakticky o vyvedení uzlu hvězdy nebo uzlu lomené hvězdy. Pak je možné ze sítě odebírat nejen sdružená, ale i fázová napětí. To může být zdrojem výrazných nesymetrií a to je úkol právě pro vinutí spojené do trojúhelníka (D) nebo lomené hvězdy (z).

7.3 Stejný převod

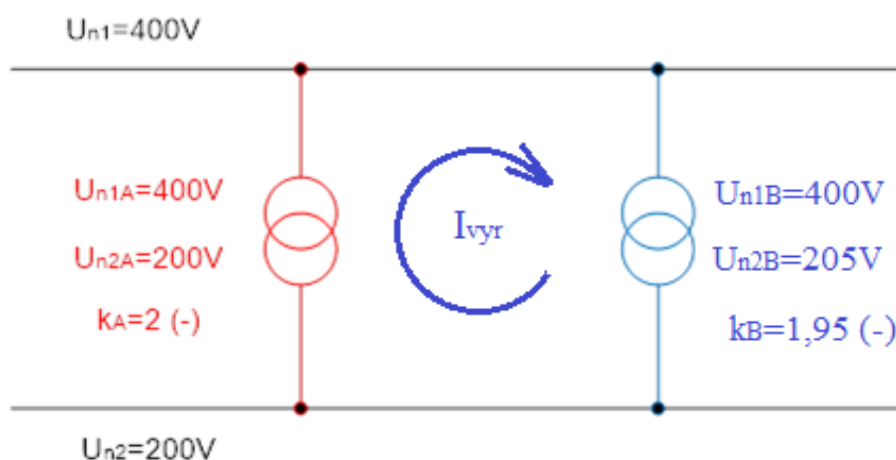
Transformátory při paralelním chodu mají stejné napájecí napětí na primární straně a musejí mít i stejná napětí na straně sekundární. Z toho by s mohlo zdát, že by měly mít i stejná jmenovitá napětí. Tato podmínka je však zbytečně přísná. Bude postačovat, pokud transformátory budou mít stejný převod a jmenovitá napětí budou stejná nebo vyšší, než jsou jmenovitá napětí příslušných sítí.

Pokud jsou transformátory vybaveny přepínačem nebo odbočkami, musí mít zvolenu stejnou odbočku.



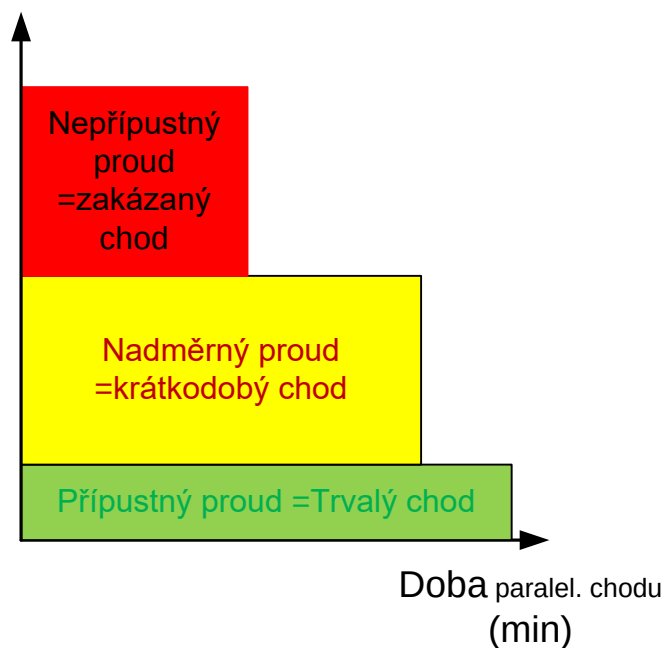
Obr. 7-5 Transformátory se stejným převodem a stejným i různým jmenovitým napětím, jako je napětí sítí.

Na rozdíl od předchozích dvou podmínek, které nepřipouštějí žádnou toleranci, může být tato podmínka splněna i jen přibližně. V tom případě však vznikne okružový vyrovnávací proud.



Obr. 7-6 Transformátory s nesterijným převodem a vyrovnávací proud mezi nimi.

Pokud nepřesáhne vyrovnávací proud přijatelnou hodnotu, lze takto transformátory provozovat trvale. Pokud tuto hodnotu vyrovnávací okružový proud přesahuje, lze transformátory takto provozovat pouze dočasně, např. jen několik minut.

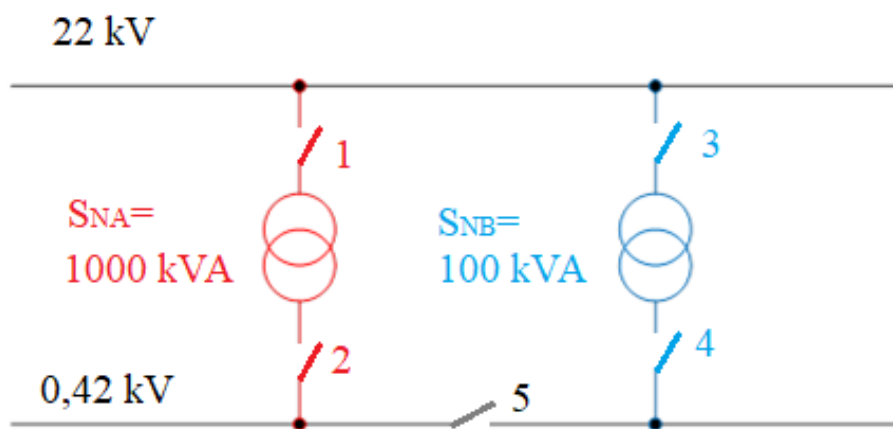


Obr. 7-7 Pásma vyrovnávacích okruhových proudů.

To se používá při přepínání zátěže z velkého transformátoru na menší.

Při poklesu spotřeby (např. v noci) je totiž neekonomické provozovat velký transformátor v odlehčeném stavu - s velkými ztrátami naprázdno. Aby nenastal beznapětový stav, připojí se nejprve transformátor menší a pak se transformátor většího výkonu odpojí na primární, ale i na sekundární straně. Jinak by byl totiž magnetován ze strany nižšího napětí a úspora ztrát by nevznikla.

Při tomto krátkodobém paralelním chodu jsou přípustné vyšší okruhové vyrovnávací proudy než jsou přípustné pro paralelní chod trvalý.



Obr. 7-8 Časová souslednost úkonů při přepínání zátěže na menší transformátor.

7 Paralelní chod transformátorů

Tab.: Princip přepínání zátěže 400V bez přerušení napájení

stav	sepnuto	vypnuto	Pozn.
Napájení Tr A	1+2+5	3+4	
Paralelní chod Tr A + Tr B	1+2+3+4+5	-	
Napájení Tr B	3+4+5	1+2	

Pro základní představu, co je to „přibližně stejný převod“ uvedeme ilustrační příklad.

Příklad:

Určete vyrovnávací proud dvou 1f transformátorů Tr A a Tr B, které mají stejná napětí nakrátko

$$u_{kA} = 0,04(-) \quad (7.1)$$

$$u_{kB} = 0,04(-) \quad (7.2)$$

Jejich jmenovitá napětí (sdružená hodnota) primární jsou shodná

$$U_{n1A} = 400(V) \quad (7.3)$$

$$U_{n1B} = 400(V) \quad (7.4)$$

Jejich jmenovitá napětí (sdružená hodnota) sekundární jsou přibližně stejná

$$U_{n2A} = 231(V) \quad (7.5)$$

$$U_{n2B} = 220(V) \quad (7.6)$$

Nejprve vypočítáme jejich převody

$$k_A = \frac{U_{n1A}}{U_{n2A}} = \frac{400}{231} = 1,7316(-) \quad (7.7)$$

$$k_B = \frac{U_{n1B}}{U_{n2B}} = \frac{400}{220} = 1,8181(-) \quad (7.8)$$

Jejich převody se liší

$$\Delta k = \frac{k_B}{k_A} = \frac{1,8181}{1,7316} = 1,049(-) \quad (7.9)$$

což je 4,9%.

Před paralelním spojením by se proto jejich fázová napětí lišila o 11V =4,9% a toto napětí vytvoří na impedancích nakrátko obou transformátorů

$$i_{vyrovnavací} = \frac{\Delta k}{u_{kA} + u_{kB}} = \frac{0,049}{0,04 + 0,04} = 0,6125(-) \quad (7.10)$$

Vyrovnávací proud je proto 61,25 % a tento proud teče vinutími, i když sekundáry obou paralelně spojených transformátorů jsou odpojeny od zátěže. Vyrovnávací proud proto vykonává

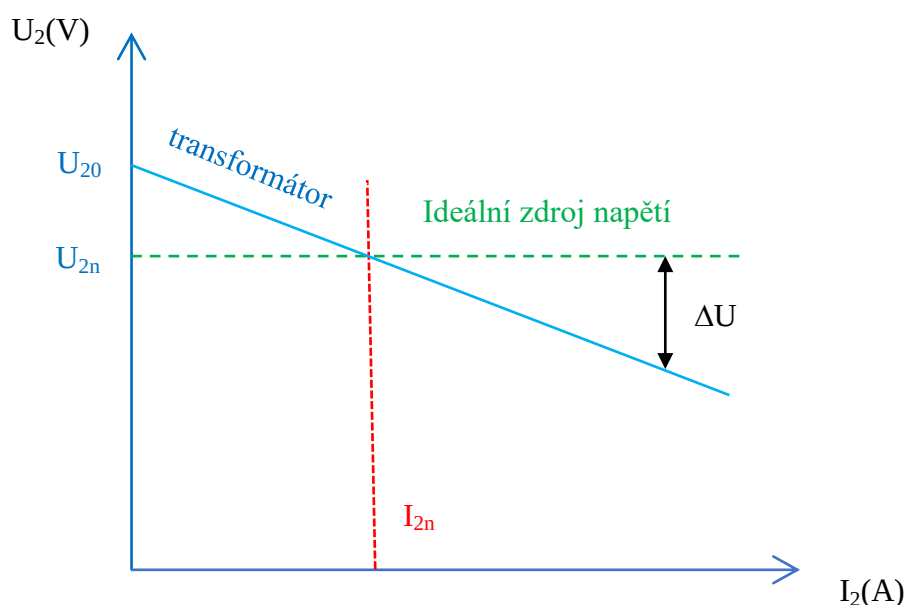
ztráty, které musí hradit napájecí síť. Tento proud činí téměř 2/3 jmenovitého proudu transformátorů a užitečné zatížení vyšší než zbývajících asi 40% by již způsobilo přetížení transformátorů.

7.4 Stejná napětí nakrátko

V kapitole věnované chodu nakrátko transformátoru je ukázáno, že napětí nakrátko v poměrné hodnotě je impedancí nakrátko transformátoru v poměrné hodnotě

$$u_k = z_k(-) \quad (7.11)$$

Jedná se obdobu vnitřního odporu u stejnosměrných zdrojů. Zde velikost vnitřního odporu charakterizuje tvrdost zdroje. Obdobně je tomu také u transformátorů, kde však tvrdost zdroje ovlivňují nejen odpory vinutí, ale zejména rozptylové reaktance vinutí. Parametry podélných prvků náhradního schéma tak charakterizuje právě napětí nakrátko. Podle nové normy se však už nepoužívá napětí nakrátko (jako dosud), ale nově pouze impedance nakrátko.



Obr. 7-9 Výstupní charakteristika transformátoru, tvrdost zdroje napětí.

Pokud mají transformátory stejnou impedanci nakrátko, pak se zatížení rozdělí rovnoměrně mezi všechny spolupracující transformátory s ohledem na jejich jmenovité výkony.

Většinou se však impedance nakrátko liší, ať už vlivem výrobních tolerancí stejných transformátorů nebo přímo spojením různých transformátorů.

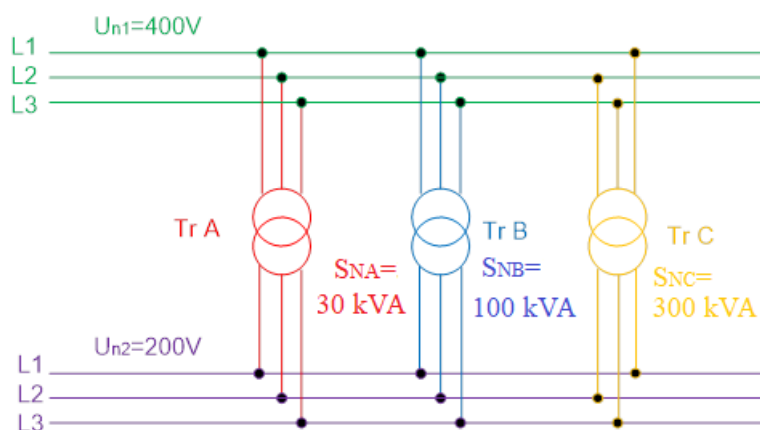
Pak transformátor s menší impedancí nakrátko (napětím nakrátko) převezme větší zatížení a naopak. Aby transformátor s nejmenším napětím nakrátko nebyl přetížen, může pracovat nejvýše se jmenovitým výkonem. Pak budou ostatní transformátory odlehčené.

7.5 Přibližně stejný typový výkon

Tato podmínka není technického rázu, ale ekonomická. Spojovat paralelně transformátory velmi odlišných výkonů se totiž ekonomicky nevyplatí. Uvádí se, že maximální poměr jmenovitých výkonů by měl být asi

$$\frac{S_{NA}}{S_{NB}} = \frac{1}{3} (-) \quad (7.12)$$

Pokud potřebujeme spojit paralelně transformátor o výkonu 100kVA, nejmenší možný transformátor by měl mít výkon alespoň 30 kVA a největší možný maximálně 300 kVA.



Obr. 7-10 Maximální a minimální velikost transformátorů, které lze připojit k základní jednotce 100 kVA.

Na výše uvedeném obrázku jsou uvedeny oba extrémů současně. K základnímu transformátoru Tr B lze připojit buď nejmenší Tr A nebo největší Tr C! Nelze spojovat paralelně Tr A a Tr C!



Otázky k tématu:

- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný sled fází?
- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný hodinový úhel?
- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný převod?
- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejnou impedanci nakrátko?
- Proč musí mít paralelně pracující transformátory podobné jmenovité výkony?



Správné odpovědi

- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný sled fází?

Nesmí vzniknout mezifázový zkrat.

- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný hodinový úhel?

Při nestejném hodinovém úhlu by tekly mezi transformátory nepřipustně vysoké proudy, které by ochrany museli ihned vypnout.

- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejný převod?

Pokud nebude převod stejný, bude mezi transformátory protékat vyrovnávací proud a to i ve stavu, kdy zátěž bude odpojena. Tento proud dělá ztráty, které musí hradit napájecí síť.

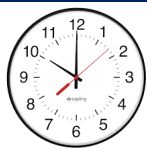
- Proč musí mít paralelně pracující transformátory stejnou impedanci nakrátko?

Při nestejně impedanci nakrátko se nemohou všechny transformátory zatěžovat jmenovitými výkony a tato skupina není dobře využita.

- Proč musí mít paralelně pracující transformátory podobné jmenovité výkony?

Paralelní spojování transformátorů výrazně odlišných jmenovitých výkonů není finančně výhodné.

8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo



Předpokládaný čas: 45 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o výhodách a nevýhodách napájení 3f zátěže trojicí 1f transformátorů a jedním 3f transformátorem
- Umět popsat vznik a vlastnosti 3f transformátoru
- Vědět, jak se definuje hodinové číslo
- Umět změřit hodinové číslo

Trojfázovou soustavu lze transformovat trojicí jednofázových transformátorů nebo jedním trojfázovým transformátorem. V obou případech můžeme jejich vinutí spojovat do hvězdy (Y,y), trojúhelníka (D,d) nebo lomené hvězdy (Z). Existují i další speciální zapojení vinutí. Strana vyššího napětí se označuje velkým písmenem, strana nižšího napětí malým písmenem.

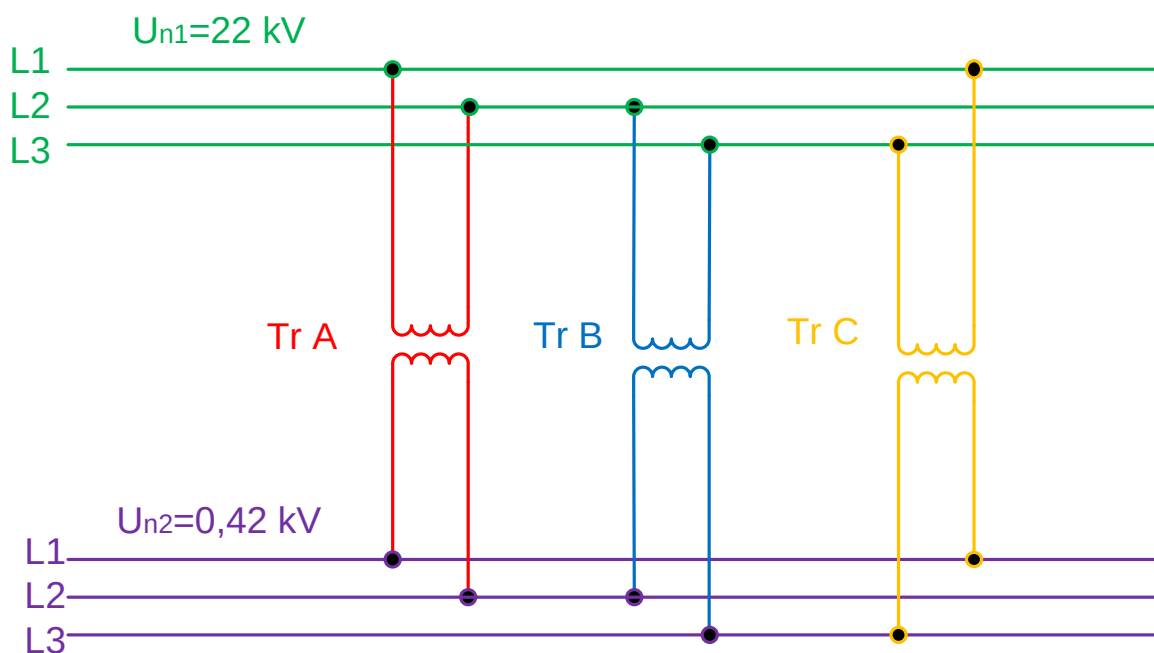
8.1 Trojice 1f transformátorů

Pokud použijeme tři jednofázové transformátorové jednotky, má toto řešení následující **nevýhody**:

- materiálově a tím i cenově náročnější, než použití jednoho 3f transformátoru
- zabírají na stanovištích v rozvodně větší prostor
- při nutnosti spojení Yy bez vyvedeného uzlu N vzniká nebezpečný nárůst napětí ($U_{\text{peak}} +45-60\%$, $U_{\text{rms}} +10-17\%$) vlivem 3 harmonické složky proudu.

výhody:

- jako záložní transformátor postačuje jen jedna 1f jednotka
- zapojení je plně symetrické
- musí se použít v případě velkých výkonů, protože 3f transformátor celkového výkonu by nebylo možné transportovat z výrobní firmy po silnici ani železnici omezeným průjezdným průřezem



Obr. 8-1 Zapojení třech 1f transformátorů, spojení Dd.

8.2 Jeden 3f transformátor

Pokud použijeme jeden 3f transformátor, má toto řešení následující

nevýhody:

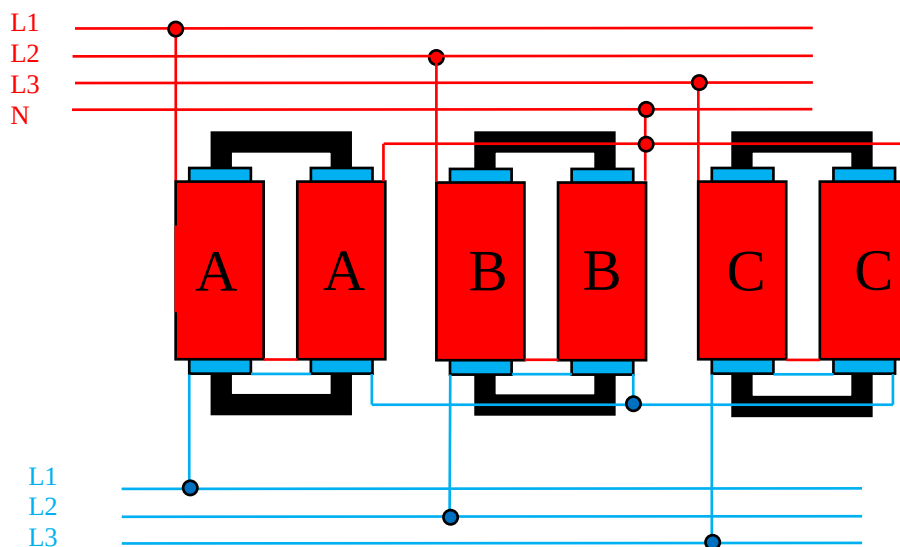
- Jako záložní (pro případ poruchy, revize) se musí použít celý 3f transformátor (nákladnější než jedna jednofázová jednotka z předchozího případu)
- Nesymetrický magnetický obvod vyžaduje nesymetrický odběr proudu naprázdno. To však není překážkou pro běžný provoz.

výhody:

- levnější
- zabírá méně místa na stanovišti v rozvodně
- menší nároky údržbu
- menší ztráty

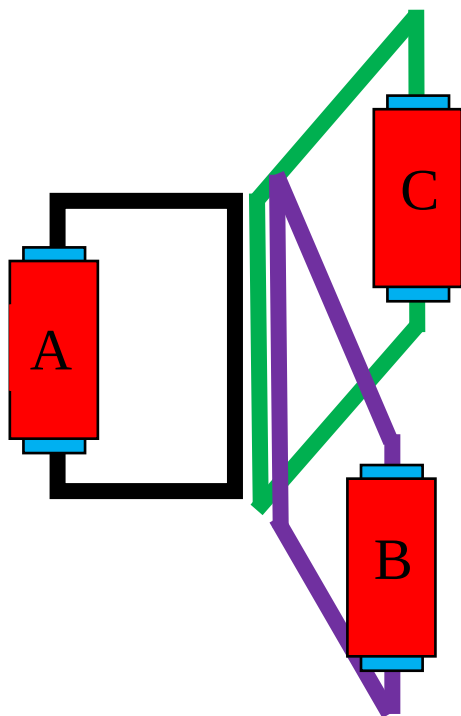
8.3 Vznik 3f transformátoru ze třech jednofázových jednotek

Vyjdeme z transformátorů jednofázových a použijeme jeden transformátor pro každou fázi samostatně.



Obr. 8-2 Použití třech 1f transformátorů, spojení YNy.

Pokud si primární i sekundární vinutí umístíme jen na jedno jádro a transformátory v prostoru uspořádáme dle obrázku – jádra bez vinutí k sobě - obdržíme následující konfiguraci.

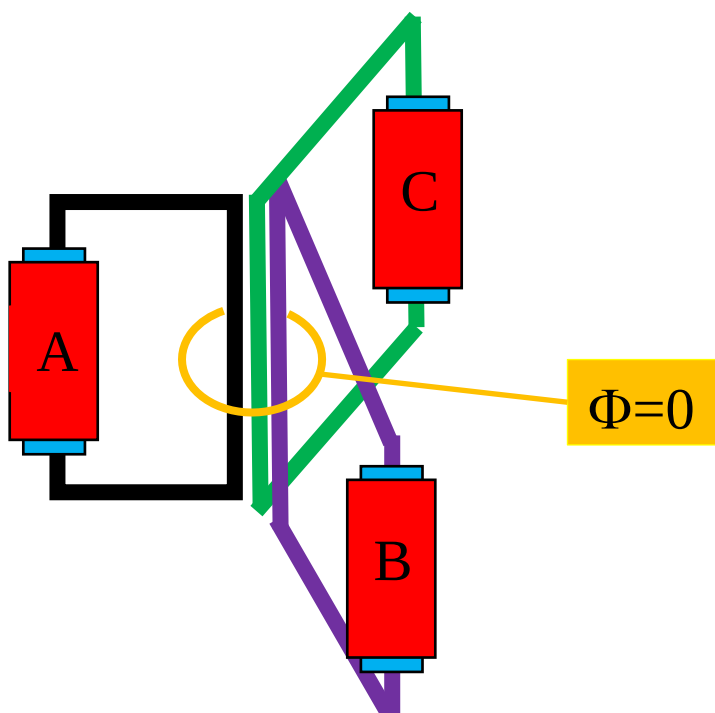


Obr. 8-3 Jádra transformátorů bez vinutí jsou umístěna u sebe a jsou magneticky propojena

V trojfázové souměrné a symetrické soustavě platí v každém časovém okamžiku, že součet proudů je nulový

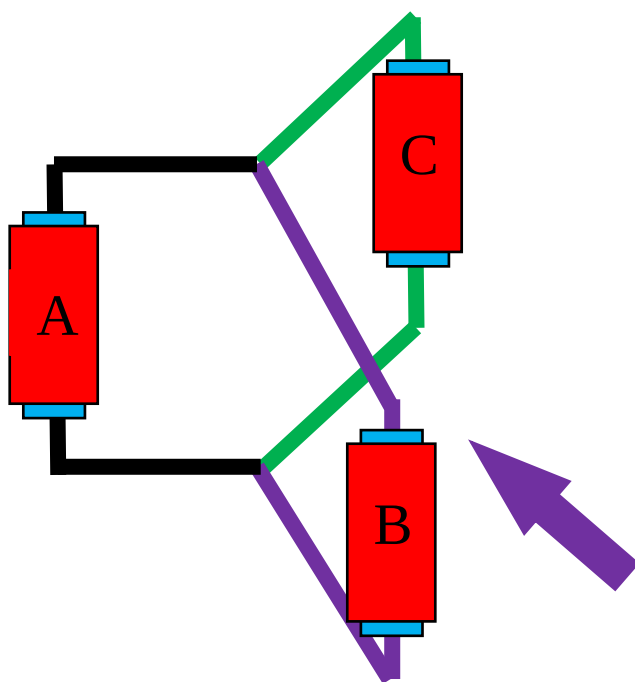
$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (8.1)$$

Protože proud vyvolává magnetický tok, je i součet toků v obepnutém jádře nulový v jakémkoliv čase.



Obr. 8-4 Nulový součet toků ve společném jádře.

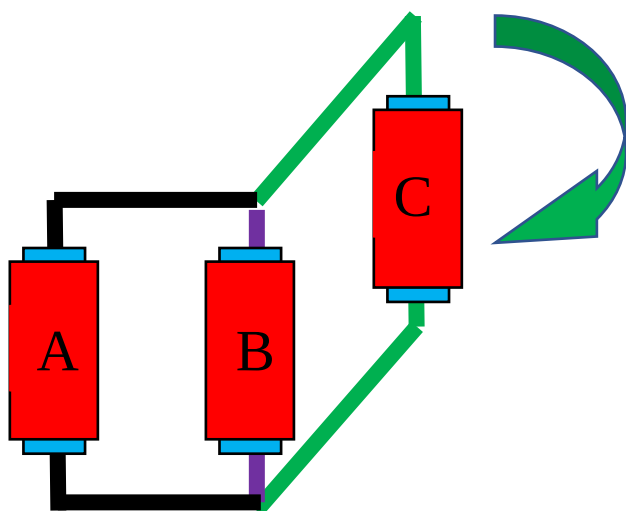
Pokud touto částí jádra neteče žádný tok, nemusíme ji konstruovat a lze ji proto vynechat.



Obr. 8-5 Vynechané společné jádro. Šipka ukazuje směr posunu jádra B do uvolněného

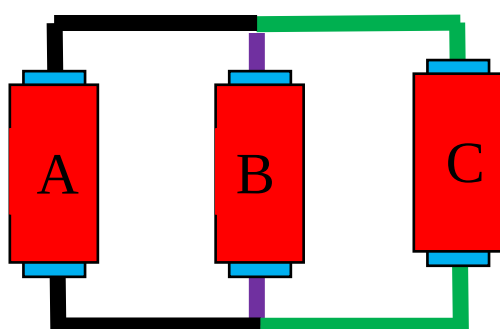
prostoru.

Do uvolněného prostoru lze přesunout jádro fáze „B“ a tím v prostoru zmenšit transformátor. Proto lze přepravit v daném průjezdném průřezu transformátor vyššího výkonu. Došlo však k zásadní změně - transformátor je zcela nesymetrický, protože fázi „B“ chybějí spojky magnetického obvodu. Fáze „A“ a „C“ spojky zůstaly zachovány.



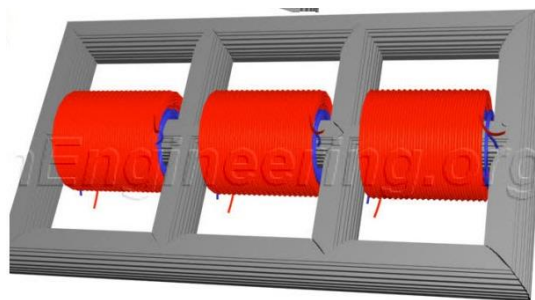
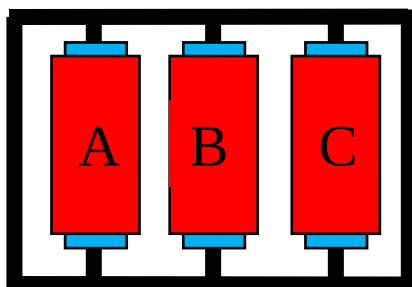
Obr. 8-6 Jádro fáze „B“ je umístěno v uvolněném prostoru. Šipka ukazuje narovnání magnetického obvodu.

Aby bylo možné do daného průjezdného průřezu umístit ještě vyšší výkon, narovnáme magnetické spojky od fáze „C“. Tím se transformátor v prostoru dále zmenší a také jeho výroba bude jednodušší a levnější.



Obr. 8-7 Narovnané magnetické spojky jádra „C“.

Toto je běžná konstrukce 3f jádrového transformátoru. Existují také pěti-jádrové transformátory, tzv. plášťová konstrukce. Stejně jako pětijádrové transformátory se chovají tři jednofázové jednotky.

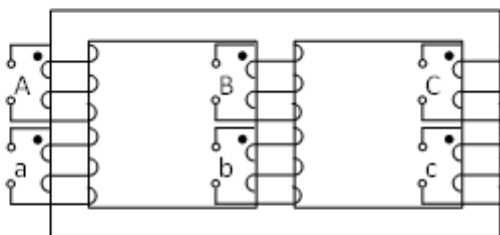
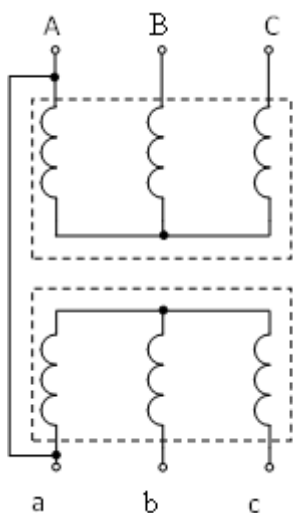


Obr. 8-8 Plášťový transformátor (a) pětijádrový (b) „Shell type“.

8.4 Hodinové číslo

Hodinové číslo je natočení fázoru strany nižšího napětí za stranou vyššího napětí ve směru sledu fází v počtu násobku 30° . Odtud název hodinový úhel. Může totiž nabývat hodnot pouze 0-11h, jinak řečeno 0- 330° .

Při jeho měření se galvanicky propojí primární vinutí se sekundárním a měří se napětí nejen sdružená na každé straně (např. U_{ab} , U_{bc}), ale i napětí mezi jednotlivými fázemi primáru a sekundáru (např. U_{bB} , U_{bC}).



Obr. 8-9 Zapojení pro měření hodinového čísla a znázornění podmínek platnosti uvedených kombinací hodinových čísel.

8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

Tab. změřených napětí pro propojení svorek A-a

Vyšší napětí	Nižší napětí	Vyšší-nižší napětí	
U_{AB}	U_{ab}	U_{Bb}	U_{Cb}
U_{BC}	U_{bc}	U_{Bc}	U_{Cc}
U_{AA}	U_{ac}		

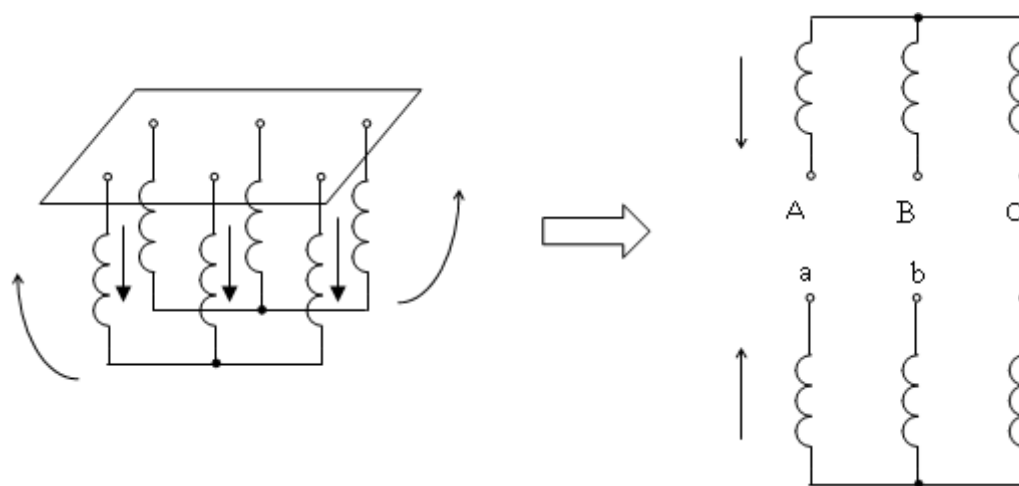
Pokud změříme všechny kombinace napětí, některá měření budou nadbytečná. Zvolíme si vhodné měřítko m_U (V/mm). Pak se sestrojí fázorové trojúhelníky primáru a sekundáru (měříme pouze sdružená napětí) a ve směru sledu fází se odměří hodinový úhel od napětí vyššího směrem k napětí nižšímu stejnojmenné fáze. Určíme těžiště trojúhelníku. Z nalezeného těžiště musíme do trojúhelníků nakreslit hvězdy fázových napětí.

Pokud budeme dodržovat podmínky

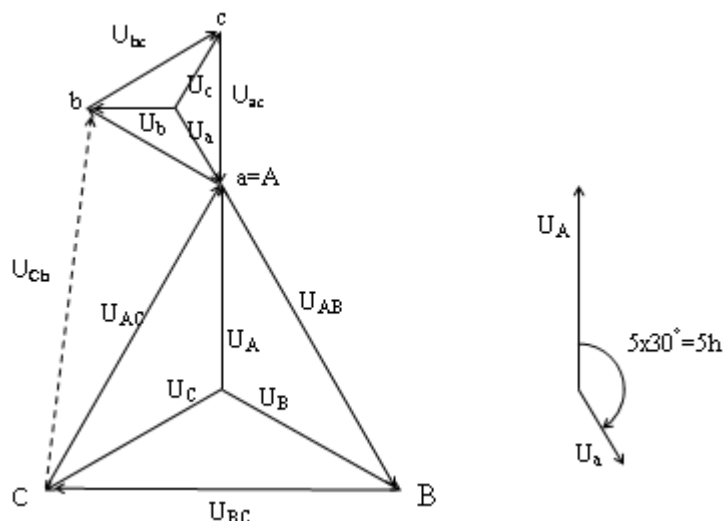
- vinutí stejnojmenných fází jsou na jednom jádře (sloupku)
- všechna vinutí mají shodný smysl
- nekřížíme vývody pod víkem transformátoru

jsou možné pouze následující hodnoty hodinových čísel:

Y	y	0	6					
	d	1	5		7	11		
	z	1	5		7	11		
D	y	1	5		7	11		
	d	0	2	4	6	8	10	
	z	0	2	4	6	8	10	



Obr. 8-10 Princip přechodu na zobrazení vinutí a jeho spojení v rovině.



Obr. 8-11 Konstrukce diagramu a odměření hodinového úhlu.

Např. v distribučních sítích se používají pro transformátory 22/0,4 kV téměř výhradně hodinová čísla Dyn1 a Yzn1. Pro napájení výkonové elektroniky se používají i hodinová čísla jiná. Např. pro napájení DC sítě MHD se používají spojení Yy0d1.

U některých zapojení transformátorů lze cyklickou záměnou fází dosáhnout změny hodinového čísla. Transformátor se pouze přepojí na svorkách a není potřeba zasahovat do jeho vnitřní konstrukce.

Otázky k tématu:

- Jaké výhody má napájení zátěže třemi jednofázovými transformátory?
- Jakou výhodu má napájení zátěže jedním 3f transformátorem?
- Proč se nepoužívá plnohodnotný 3f transformátor v prostorovém uspořádání?
- Může mít hodinový úhel jakoukoliv hodnotu?
- Proč musíme při měření hodinového úhlu propojit stranu vyššího napětí a nižšího napětí?
- Můžeme výše zmíněné propojení strany vyššího a nižšího napětí provést na jakýchkoliv dvou svorkách?
- Pro spojené svorky A-a byla naměřena následující napětí:
 $U_{ab}=200V$, $U_{bc}=200V$, $U_{ac}=200V$, $U_{AB}=230V$, $U_{BC}=230V$,
 $U_{AC}=230V$, $U_{Bc}=202V$, $U_{Bb}=31V$, $U_{Cc}=31V$, $U_{Cb}=202V$.
 Zkonstruuje a určete hodinový úhel. Za předpokladu splnění výše uvedených podmínek vytipujte možné spojení transformátoru.
- Pro spojené svorky A-a byla naměřena následující napětí:
 $U_{ab}=200V$, $U_{bc}=200V$, $U_{ac}=200V$, $U_{AB}=230V$, $U_{BC}=230V$,
 $U_{AC}=230V$, $U_{Bc}=304V$, $U_{Bb}=114V$, $U_{Cc}=114V$, $U_{Cb}=114V$.
 Zkonstruuje a určete hodinový úhel. Za předpokladu



splněných výše uvedených podmínek vytipujte možné spojení transformátoru.



Správné odpovědi

- *Jaké výhody má napájení zátěže třemi jednofázovými transformátory?*

Záloha je jen jeden 1f transformátor. Lze takto realizovat blokový transformátor vyššího výkonu než v provedení s jedním 3f transformátorem.

- *Jakou výhodu má napájení zátěže jedním 3f transformátorem?*

Transformátor je menší a levnější než tři jednofázové jednotky.

- *Proč se nepoužívá plnohodnotný 3f transformátor v prostorovém uspořádání?*

Do průjezdného průřezu se vejde jen transformátor na malý výkon. Technická a finanční náročnost.

- *Může mít hodinový úhel jakoukoliv hodnotu?*

Nemůže, pouze násobky 30° .

- *Proč musíme při měření hodinového úhlu propojit stranu vyššího napětí a nižšího napětí?*

Musíme mít možnost změřit napětí z vyšší strany na nižší.

- *Můžeme výše zmíněné propojení strany vyššího a nižšího napětí provést na jakýchkoliv dvou svorkách?*

Ano, můžeme, ale pak se při konstrukci trojúhelníků ztotožní jiné vrcholy (jiné propojené svorky).

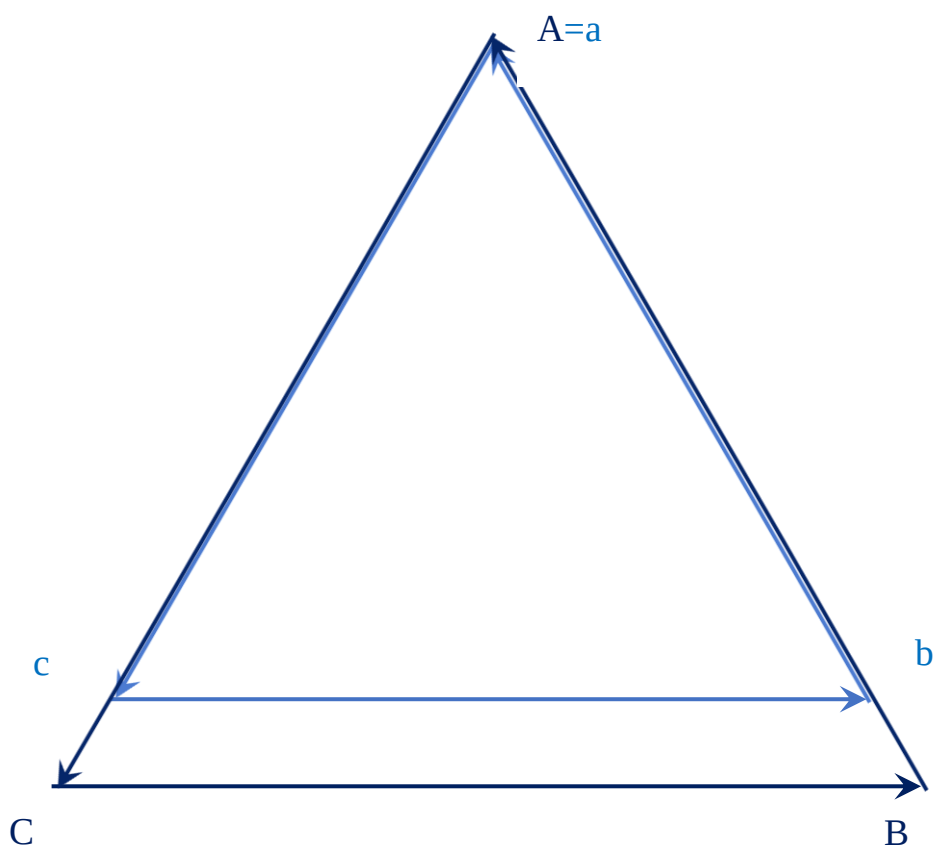
- *Pro spojené svorky A-a byla naměřena následující napětí: $U_{ab}=200V$, $U_{bc}=200V$, $U_{ac}=200V$, $U_{AB}=230V$, $U_{BC}=230V$, $U_{AC}=230V$, $U_{Bc}=214V$, $U_{Bb}=30V$, $U_{Cc}=30V$, $U_{Cb}=214V$. Zkonstruujte a určete hodinový úhel. Za předpokladu splněných výše uvedených podmínek vytipujte možné spojení transformátoru.*

8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

Zvolíme si měřítko $m_V=20\text{V/cm}$. Pak budou mít napětí následující velikosti:

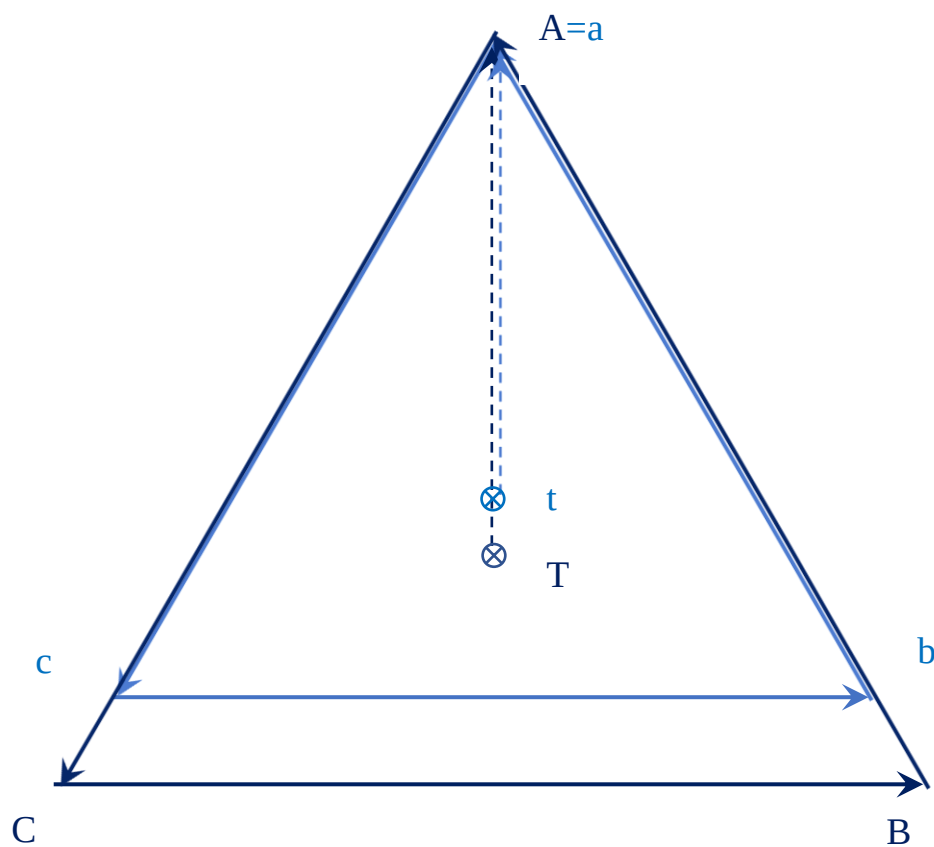
$U_{ab}=10\text{cm}$, $U_{bc}=10\text{cm}$, $U_{ac}=10\text{cm}$, $U_{AB}=11,5\text{cm}$, $U_{BC}=11,5\text{cm}$, $U_{AC}=11,5\text{cm}$, $U_{Bc}=10,7\text{cm}$, $U_{Bb}=1,5\text{cm}$, $U_{Cc}=1,5\text{cm}$, $U_{Cb}=10,7\text{cm}$.

Zkonstruujeme trojúhelník strany vyššího napětí. Sled fází u prvního konstruovaného trojúhelníku zvolíme libovolně. U druhého trojúhelníku nám sled fází vyjde dle změřených napětí.



8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

Nalezneme těžiště obou trojúhelníků a zkonstruujeme stejnojmenná fázová napětí. . Např. U_A a U_a .



Hodinový úhel je $0^\circ = 0h$. Možná spojení jsou $Yy0$, $Dd0$.

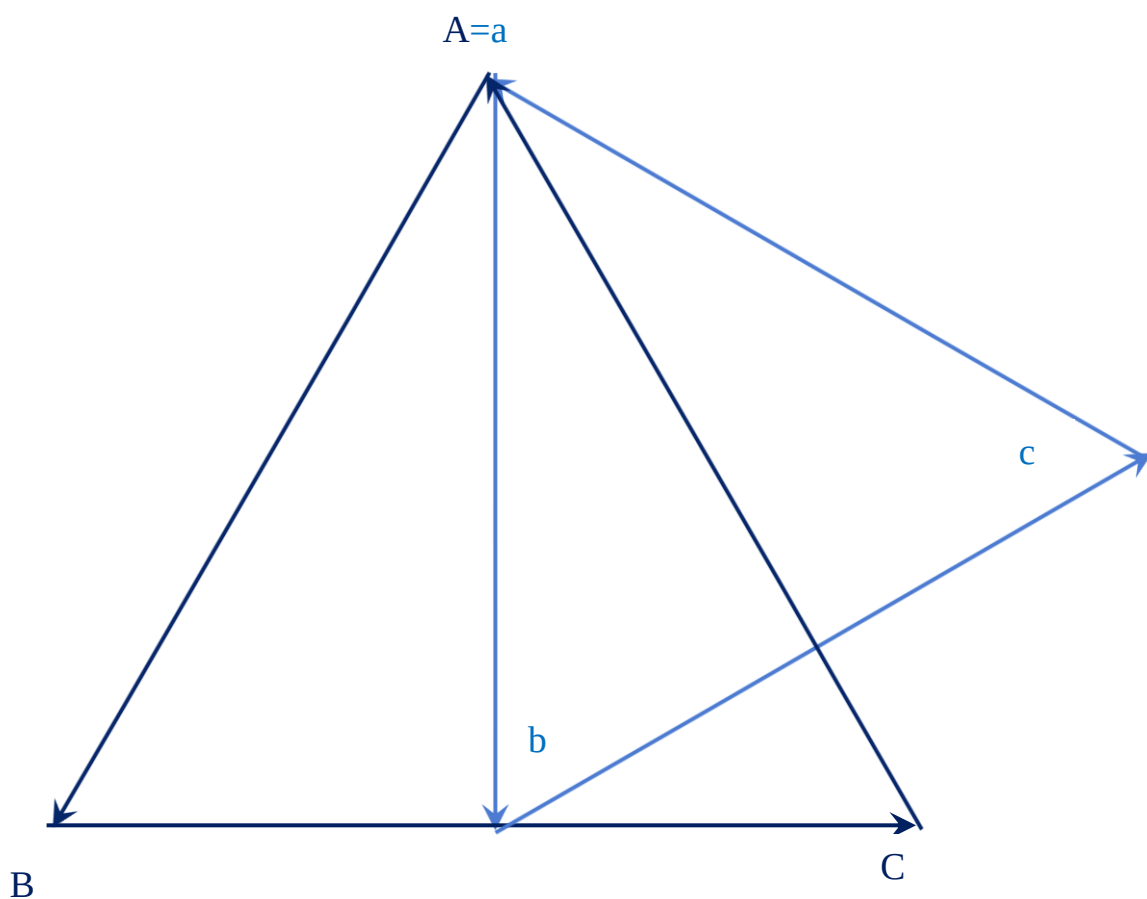
8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

- Pro spojené svorky A-a byla naměřena následující napětí: $U_{ab}=200V$, $U_{bc}=200V$, $U_{ac}=200V$, $U_{AB}=230V$, $U_{BC}=230V$, $U_{AC}=230V$, $U_{Bc}=304V$, $U_{Bb}=114V$, $U_{Cc}=114V$, $U_{Cb}=114V$. Zkonstruujte a určete hodinový úhel. Za předpokladu splnění výše uvedených podmínek vytipujte možné spojení transformátoru.

Zvolíme si měřítko $m_V=20V/cm$. Pak budou mít napětí následující velikosti:

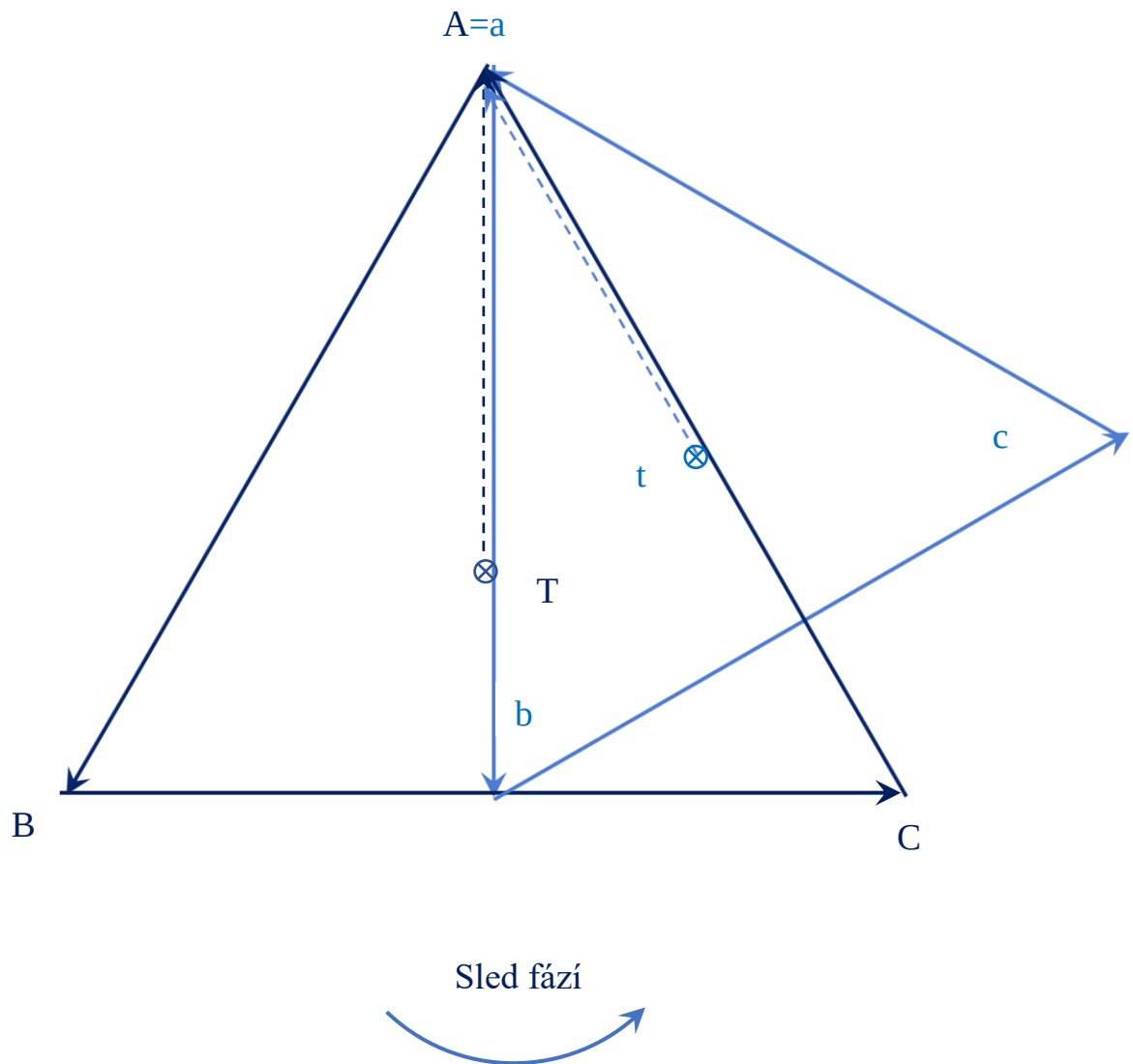
$U_{ab}=10cm$, $U_{bc}=10cm$, $U_{ac}=10cm$, $U_{AB}=11,5cm$, $U_{BC}=11,5cm$, $U_{AC}=11,5cm$, $U_{Bc}=15,2cm$, $U_{Bb}=5,7cm$, $U_{Cc}=5,7cm$, $U_{Cb}=5,7cm$.

Zkonstruujeme trojúhelník strany vyššího napětí. Sled fází u prvního konstruovaného trojúhelníku zvolíme libovolně. U druhého trojúhelníku nám sled fází vyjde dle změřených napětí.



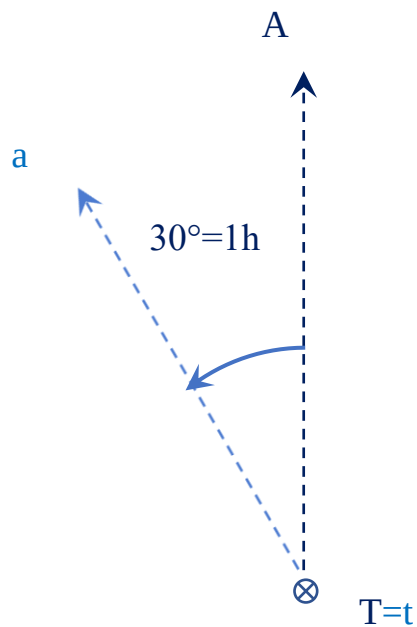
8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

Nalezneme těžiště obou trojúhelníků a zkonstruujeme stejnojmenná fázová napětí. Např. U_A a U_a .



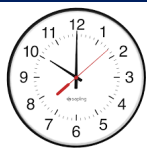
8 Vznik 3f transformátoru a hodinové číslo

Stejnomené fázory napětí posuneme do jednoho těžiště a změříme úhel dle definice, tj. ve směru sledu fází, od vyššího k nižšímu napětí.



Hodinový úhel je $30^\circ = 1h$. Možná spojení jsou $Dy1$, $Yd1$.

9 Princip asynchronního stroje



Předpokládaný čas: 20 min



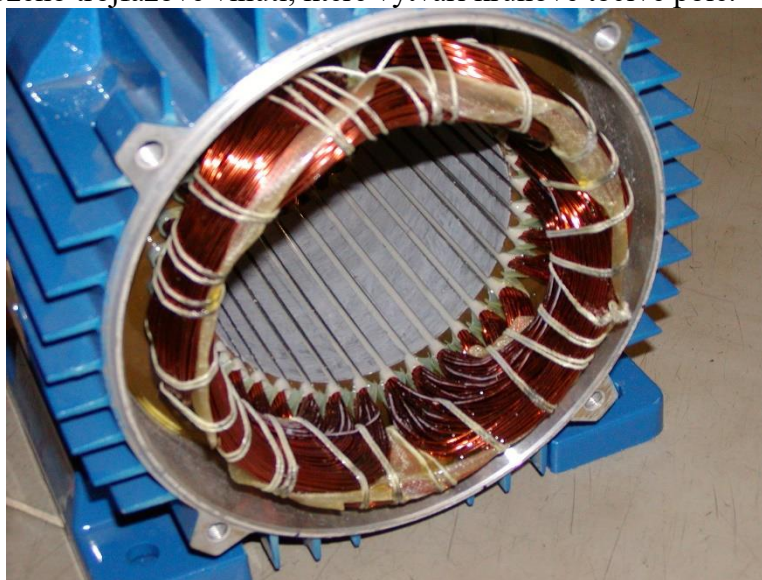
Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o konstrukci asynchronních strojů
- Umět popsat princip činnosti asynchronního stroje
- Vědět, jaký kmitočet je v rotoru stroje pro různé rychlosti
- Umět definovat skluz stroje

Asynchronní stroje patří v průmyslu mezi nejpoužívanější typ strojů. V provedení s kotvou nakrátko jsou nenáročné na údržbu a jsou i relativně levné. Je kompaktní, dnes téměř výhradně v uzavřeném provedení, s krytím IP 54-55 je odolný proti stříkající až tryskající vodě. Pokud se napájejí ze sítě, používají se tam, kde není potřeba regulovat rychlost a moment. Avšak při napájení z kmitočtového měniče je možné stroj dobře řídit. Výkony jsou od několika jednotek wattů až po 20 MW (pomaloběžné stroje), resp. 6 MW (pro rychloběžné stroje).

9.1 Konstrukční řešení asynchronního stroje

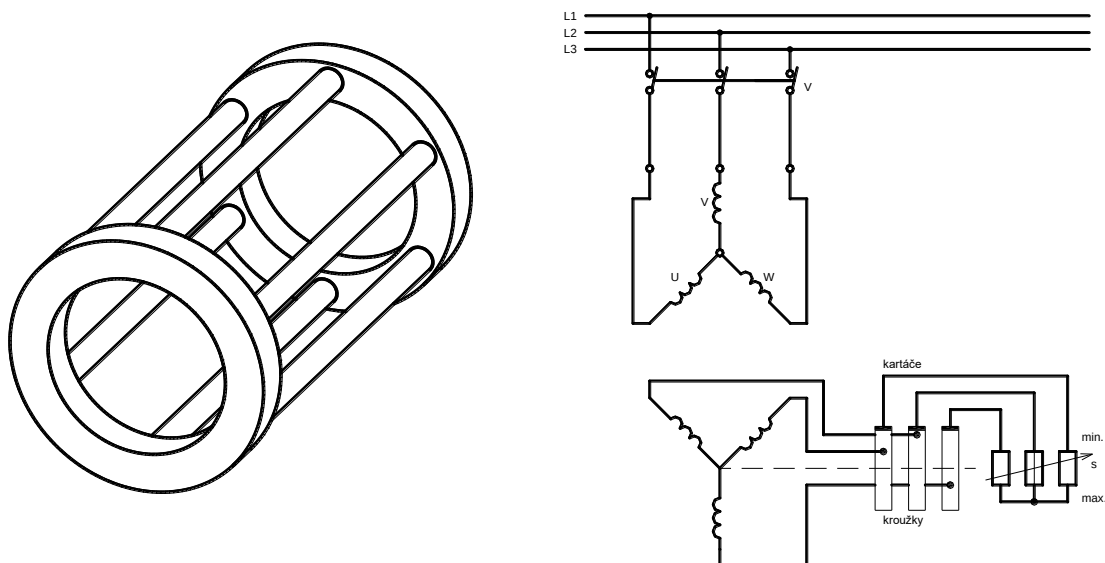
Ve statoru je založeno trojfázové vinutí, které vytváří kruhové točivé pole.



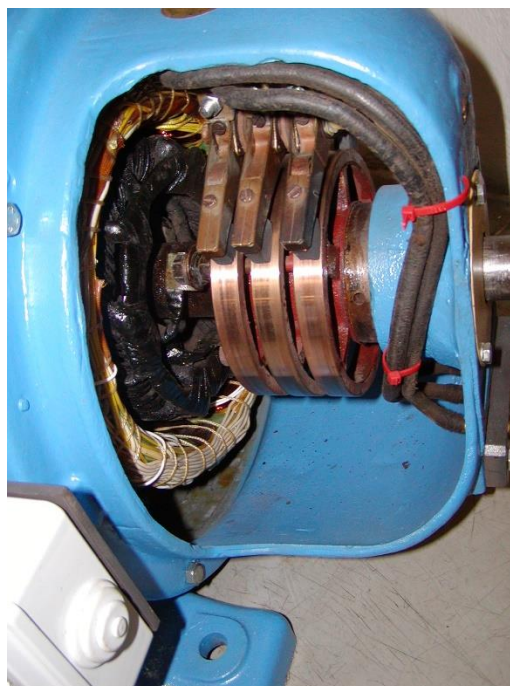
Obr. 9-1 Statorové vinutí a magnetický obvod v kostře stroje

Malá vzduchová mezera (cca 0,1 mm) odděluje statorový a rotorový magnetický obvod (oba listěné). Její velikost určuje magnetizační proud, který se odebírá ze sítě. Větší vzduchová mezera představuje větší magnetický odpor a proto i vyšší magnetizační (jalový induktivní) proud. Tento jalový příkon a zhoršený účinnost je v průmyslu nutné kompenzovat. Rotor může být proveden jako

- *klec nakrátko* (Cu, Al)
- *vinutý*, přičemž vinutí je vyvedeno pomocí kroužků a kartáčů



Obr. 9-2 Princip konstrukce vinutí rotoru. (a) kotva = klec nakrátko (b) vinutý rotor (=kotva)



Obr. 9-3 Princip konstrukce vinutí rotoru. (a) kotva = klec nakrátko (b) vinutý rotor (=kroužková kotva)

Vinutý rotor má obdobně jako stator třífázové vinutí založeno v drážkách. To se vždy spojuje do hvězdy a takto vzniklý uzel se nevyvádí ven, ale je vytvořen přímo na rotující části stroje – rotoru a proto je nepřístupný.

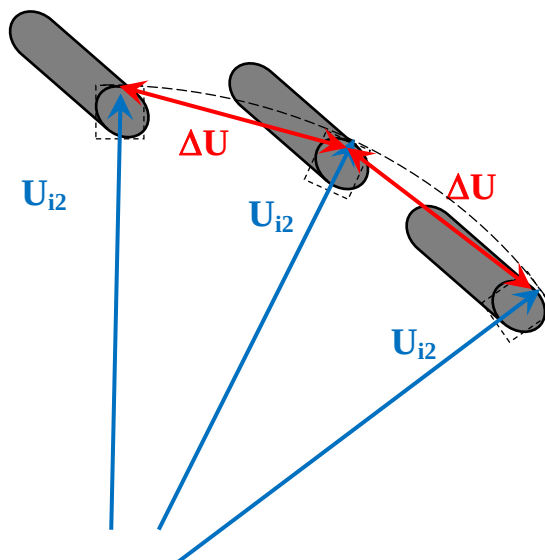
Počet pólů rotorového vinutí musí být shodný s počtem pólů statoru. Vývody z pohybujícího se rotoru na svorkovnici se realizují pomocí kluzných kontaktů – třech kroužků a uhlíkových nebo kovografitových kartáčů. Kluzný kontakt je relativně náročný na údržbu, proto se mnohem častěji užívají stroje s klecovou kotvou, které tento kluzný kontakt nemají.

Klec má v drážkách hliníkové (nebo měděné) tyče bez jakékoliv izolace a na koncích jsou tyče spojeny (rovněž hliníkovými nebo měděnými) kruhy nakrátko. Toto provedení je na údržbu nenáročné.

9.2 Princip činnosti

Připojením vinutí ve statoru ke zdroji vznikne kruhové točivé pole statoru, jehož magnetické napětí je F_1 . Toto pole protíná stojící rotorové vodiče. Podle indukčního zákona se do vodičů rotoru indukuje napětí U_{i2} .

V každém vodiči ve všech drážkách se indukuje napětí sice stejně veliké, ale fázově pootočené.

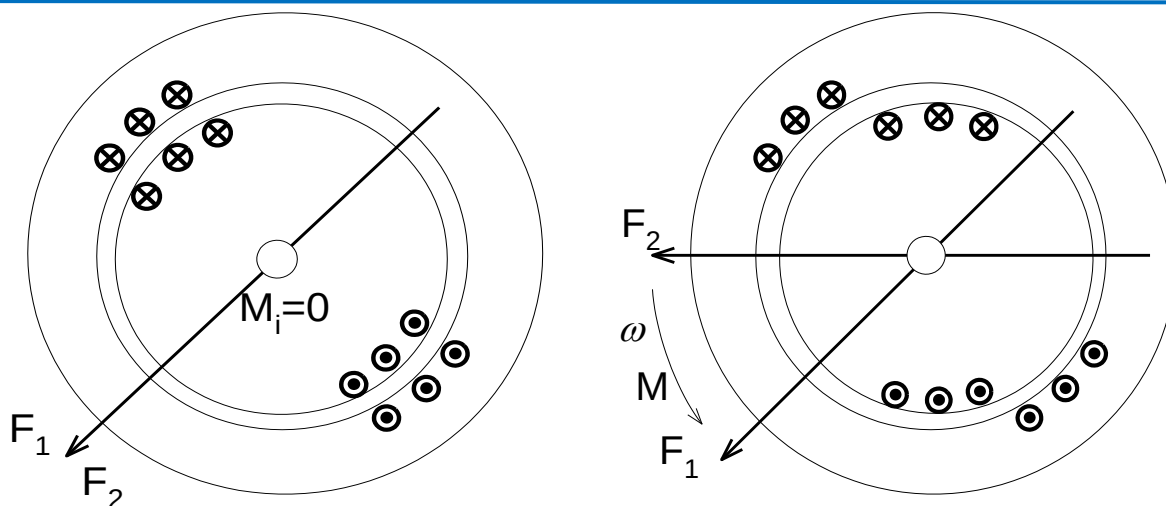


Obr. 9-4 Indukované napětí v jednotlivých vodičích klece nakrátko

Rozdílové napětí mezi těmito fázory vyvolá proudy, protože vodiče tvoří uzavřený galvanický celek. Začne protékat rotorový proud I_2 . Ten vytvoří své vlastní magnetické pole F_2 . Toto pole je také točivé pole, stejně jako točivé pole statoru. Vzájemným působením těchto dvou polí vznikne vnitřní elektromagnetický moment

$$\vec{M} = \vec{F}_1 \times \vec{F}_2 \quad (9.1)$$

Poznámka: Systém jako celek se snaží dosáhnout maximální magnetické energie (viz kapitola 1), které dosáhne, pokud se osy obou polí ztotožní.



Obr. 9-5 Vznik točivého momentu

Rotor se začíná rozbíhat, stoupá jeho úhlová rychlost ω (rad.s^{-1}) a otáčivá rychlost n (ot.min^{-1}), přičemž platí vztah

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (9.2)$$

Současně klesá vzájemná (relativní) rychlost ω_2 mezi točivým polem statoru a mechanickou rychlostí rotoru. Proto klesá hodnota indukovaného napětí do rotorových vodičů U_{i2} a samozřejmě i jeho kmitočet f_2 .

Hypoteticky pro synchronní rychlost ω_1 ($n=n_1$) je pak $\omega_2 = 0$, do vodičů rotoru se neindukuje žádné napětí, tedy $I_2 = 0$ a proto i $M_i = 0$.

Poznámka: U_{i20} je napětí, které bychom změřili na rozpojeném vinutí rotoru při jmenovitě napájeném statoru.

Proto by nutně nastal pokles otáček vlivem tření a ztrát v ložiskách i ventilátoru na hřídeli. Tím se opět obnoví protínání vodičů rotoru polem statoru a M_i opět roste až do vyrovnání ztrát (a případně momentu zátěže) na hřídeli.

Napětí a proudy indukované do rotoru mají kmitočet daný relativní rychlostí pole statoru a vodičů rotoru ω_2 . Platí vztah

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega \quad (9.3)$$

Pokud tuto relativní rychlost vztáhneme na rychlost synchronní n_s , dostaneme definici skluzu

$$s = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (9.4)$$

Pro dvoupólový stroj platí $n_1 = n_s$, pro vícepólové stroje je n_s definována vztahem

$$n_s = \frac{n_1}{p} \quad (9.5)$$

kde je p počet pólových dvojic a který bude vysvětlen později. Pak můžeme pomocí skluzu vyjádřit také úhlovou rychlost točivého pole rotoru

$$\omega_2 = \omega_1 - \omega = s\omega_1 \quad (9.6)$$

Touto rychlostí se točivé pole F_2 točí okolo pohybujícího se (točícího se) rotoru. Úhlová rychlost rotoru je

$$\omega = (1 - s)\omega_1 \quad (9.7)$$



Otázky k tématu:

- Jak se konstrukčně liší rotory asynchronních strojů?
- Pokud má stroj více pólů, má vyšší synchronní rychlost?
- Je indukované napětí v tyčích klece nakrátko stejné?
- Jak je definován skluz stroje?



Správné odpovědi

- Jak se konstrukčně liší rotory asynchronních strojů?

Je možné mít klec nakrátko nebo kroužkový rotor = kotva vinutá.

- Pokud má stroj více pólových dvojic p , má vyšší synchronní rychlost?

Nikoliv, naopak má rychlost p -krát nižší.

- Je indukované napětí v tyčích klece nakrátko stejné?

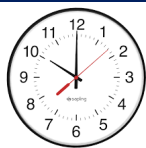
Ano, ale jen co se týká jeho velikosti. Fázový posun mají jednotlivé tyče různý.

- Jak je definován skluz stroje?

Skluz je rozdíl synchronní rychlosti točivého pole statoru a mechanické otáčivé rychlosti, vztažený na synchronní rychlost statorového točivého pole. Vztah je

$$s = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (9.8)$$

10 Rychlosti v asynchronním stroji



Předpokládaný čas: 20 min

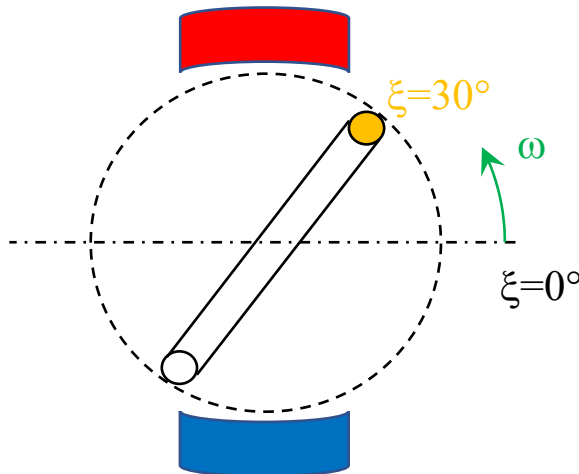


Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o uspořádání pólů dvojpólového a vícepólového stroje
- Umět popsat vznik vzorce pro kmitočet, počet pólů a rychlosti stroje
- Vědět, jak se definuje skluz
- Umět vypočítat úhlovou rychlost z otáčivé rychlosti a naopak
- Umět charakterizovat význačné hodnoty skluzu a rychlosti asynchronního motoru.
- Umět vysvětlit princip přepočtu úhlové rychlosti a otáčivé rychlosti.
- Mít přehled o výpočtu mechanického výkonu a veličin na hřídeli.

10.1 Synchronní rychlost točivého pole statoru

Mějme na statoru jednu pólovou dvojici sever - jih, tj. jeden pól pár.



Obr. 10-1 Dvojpólové uspořádání statoru $p=1$, $2p=2$.

Do rotujícího závitu se naindukuje průběh jedné periody napětí po jedné mechanické otáčce, tj. když se žlutě označený vodič dostane na stejnou mechanickou pozici. Jedna elektrická perioda indukovaného napětí představuje 360° elektrických, dosažení stejné polohy žlutě označeného vodiče představuje 360° mechanických. Jedna elektrická perioda je dokončena v okamžiku, kdy je žlutě označený vodič vzhledem k magnetickému poli opět ve stejné poloze, tj. před severním pólem.

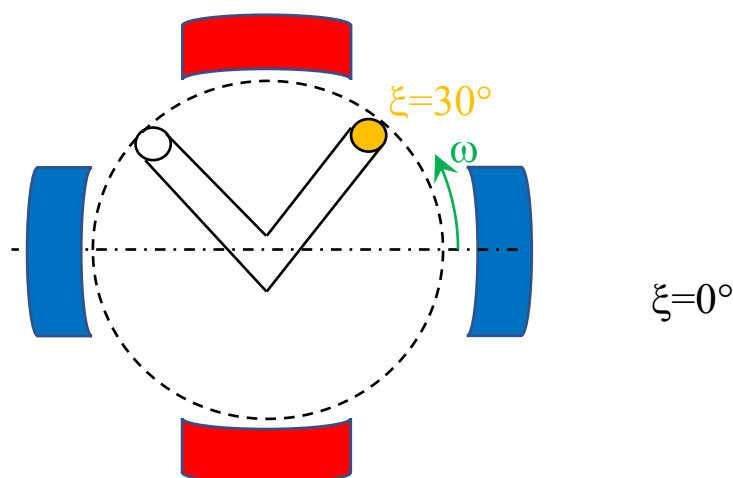
Proto platí vzorec

$$f(\text{Hz}) = n (\text{ot. s}^{-1}) \quad (10.1)$$

Kmitočet indukovaného napětí f je udáván v jednotkách (Hz), což je počet kmitů (nebo period) za sekundu. Rychlost n je opět počet otáček (jakýchsi mechanických cyklů = period) za sekundu. Otáčivou rychlost však jsem zvyklí udávat v jednotkách $n (\text{ot. min}^{-1})$, což je jednotka 60x vyšší. Proto vztah upravíme takto

$$f(\text{Hz}) \cdot 60 = n (\text{ot. min}^{-1}) \quad (10.2)$$

Nyní se podívejme na situaci, kdy je statorové uspořádání čtyřpólové. Předně je potřeba poznamenat, že póly se po obvodu střídají **S – J – S – J**.



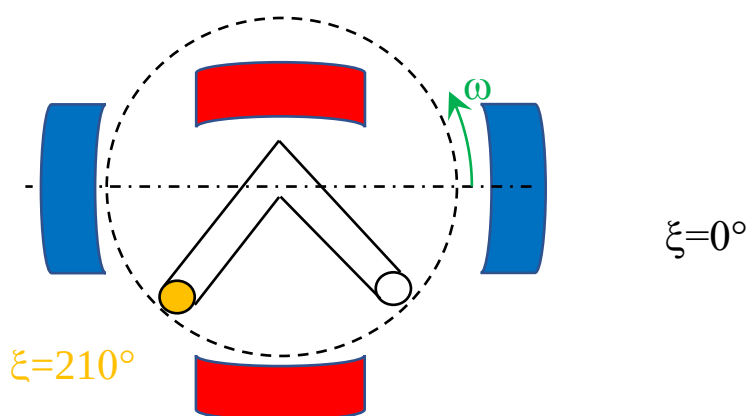
Obr. 10-2 Čtyřpólové uspořádání statoru $p=2$, $2p=4$.

Cívka, která má zabírat v ideálním případě s plným tokem pólu, musí nyní mít vrcholový úhel nikoliv 180° jako v předchozím případě, ale poloviční, tj. 90° .

Jakmile cívka zaujme v magnetickém poli tutéž pozici, naindukovala se do ní právě jedna perioda napětí, tj. 360° elektrických.

Tato pozice je vyjádřena situací, kdy žlutě označený vodič bude opět před severním pólem. To však v tomto případě nastane již po 180° mechanických ($30^\circ + 180^\circ = 210^\circ$), tj. po jedné polovině mechanické otáčky. Pokud bychom měli stejnou rychlost otáčení cívky, jako v předchozím případě, mělo by indukované napětí do rotující cívky dvojnásobný kmitočet. Protože však kmitočet v síti je pevně daný, musíme pro jeho dodržení snížit rychlost otáčení na polovinu. Proto platí nyní vztah

$$\frac{f(\text{Hz}) \cdot 60}{2} = n (\text{ot. min}^{-1}) \quad (10.3)$$


Obr. 10-3 Čtyřpólové uspořádání statoru $p=2$, $2p=4$.

Jediná změna nastala v počtu pólových dvojic, kdy první případ měl $p=1$ a tento druhý případ má $p=2$. Proto lze diskutovaný vztah zobecnit na výraz

$$\frac{f(\text{Hz}) \cdot 60}{p(-)} = n (\text{ot. min}^{-1}) \quad (10.4)$$

Počet pólových dvojic byl proto již v prvním výrazu, ale pro $p=1$ byl jmenovatel $p=1$ ve výrazu zbytečný.

Protože bylo výše uvedeno, že kmitočet sítě je pevně dán, můžeme vypočítat tabulku synchronních rychlostí pro dva nejpoužívanější průmyslové kmitočty, a to pro $f=50\text{Hz}$ a $f=60\text{Hz}$.

Tab. Synchronní rychlosti točivého pole statoru

$p (-)$	50 Hz	60 Hz
1	3000	3600
2	1500	1800
3	1000	1200
4	750	900

Z tohoto rozboru chování můžeme učinit ještě jeden důležitý závěr, týkající se vzájemného vztahu mechanických a elektrických úhlů.

$$\alpha_{el} = p \alpha_{mech} \quad (10.5)$$

10.2 Synchronní rychlost točivých polí statoru a rotoru

V předchozím textu byl zaveden a definován skluz asynchronního stroje

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (10.6)$$

kde je n_1 synchronní rychlost točivého pole statoru
 n mechanická rychlost rotoru (lze změřit otáčkoměrem)

Kmitočet f_2 napětí U_{i2} , které se indukuje do rotoru je pak

$$f_2 = s f_1 \quad (10.7)$$

Pro rychlost rotorového točivého pole platí obdobný vztah, a to

$$n_2 = s n_1 \quad (10.8)$$

Pokud nyní sečteme mechanickou rychlost n a rychlost točivého pole rotoru n_2 , dostaneme

$$n + n_2 \quad (10.9)$$

a za n_2 dosadíme

$$n + n_2 = n + s n_1 \quad (10.10)$$

a dosadíme ještě za skluz

$$n + n_2 = n + s n_1 = n + \left(\frac{n_1 - n}{n_1} \right) n_1 \quad (10.11)$$

Vidíme, že synchronní rychlost můžeme zkrátit

$$n + n_2 = n + s n_1 = n + (n_1 - n) \quad (10.12)$$

a po úpravě máme

$$n + n_2 = n_1 \quad (10.13)$$

Tento vztah znamená, že rychlost točivého pole rotoru n_2 se sečte s mechanickou rychlostí rotoru n a **dohromady se točí synchronní rychlostí n_1 jako pole statoru!**

10.3 Význačné hodnoty skluzu

V tomto odstavci si ukážeme několik významných stavů stroje a vypočteme pro ně skluz. Budeme pro jednoduchost uvažovat stroj dvojpólový $2p=2$, $f=50\text{Hz}$.

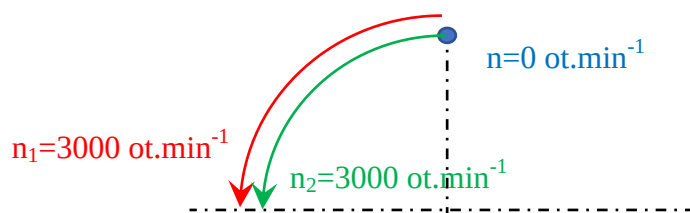
Předně se jedná o okamžik rozběhu s klidu, kdy je stroj sice již připojen k síti, ale ještě se nezačal pohybovat. Tomuto stavu se též říká **stav nakrátko**.

Výstupem stroje totiž není vinutí rotoru (které z principu musí být spojeno stále nakrátko), ale hřídel stroje a tento výstup je „nakrátko“ v případě, že se nepohybuje (nemůže pohybovat).

$$n_1 = 3000 \text{ ot. min}^{-1} \quad (10.14)$$

$$n = 0 \text{ ot. min}^{-1} \quad (10.15)$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 0}{3000} = 1 (-) \quad (10.16)$$



Obr. 10-4

Okamžik zapnutí stroje na síť.

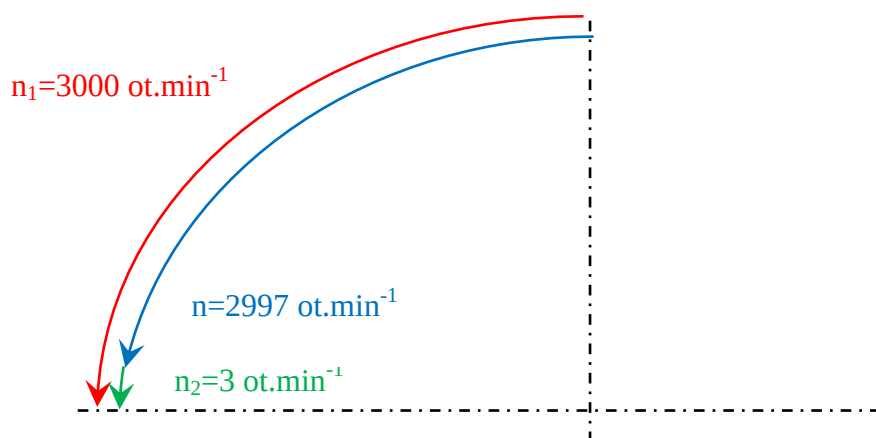
Pokud není stroj připojen k mechanické zátěži, rozběhne se na rychlost velice blízkou rychlosti synchronní a je to tzv. rychlost naprázdno. Tato rychlost naprázdno se blíží synchronní rychlosti tím více, čím je stroj vyššího jmenovitého výkonu. Např. pro motor s $2p=6$, $f=50\text{Hz}$ o výkonu $P=30\text{ kW}$ je to přibližně $n_0=999,7\text{ ot.min}^{-1}$. Tomuto stavu se též říká **stav naprázdno**.

$$n_1 = 3000\text{ ot.min}^{-1} \quad (10.17)$$

$$n = 2997\text{ ot.min}^{-1} \quad (10.18)$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 2997}{3000} = 0,001 \cong 0 (-) \quad (10.19)$$

Skluz je téměř nulový.



Obr. 10-5 Stav naprázdno.

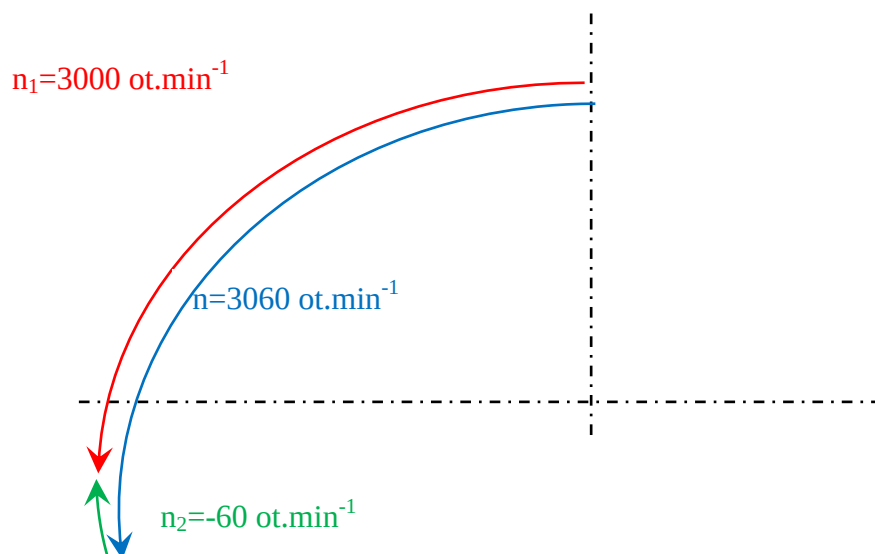
Pokud je stroj poháněn např. turbínou (větrnou, vodní), bude jeho rychlost nadsynchronní a jedná se **generátor na síti**. Mechanický příkon je měněn na činný elektrický výkon a ten je dodáván do sítě. Jalový příkon je ze sítě generátorem stále odebírán a je nutné jej kompenzovat.

$$n_1 = 3000\text{ ot.min}^{-1} \quad (10.20)$$

$$n = 3060\text{ ot.min}^{-1} \quad (10.21)$$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - 3060}{3000} = -0,03 < 0 (-) \quad (10.22)$$

Skluz je záporný.



Obr. 10-6 Stav generátoru na síti.

Záporná rychlost n_2 znamená, že rotorové točivé pole se pohybuje proti směru mechanické rychlosti rotoru.

Pokud je stroji v chodu najednou skokově (přepnutím) změněn sled fází na statoru, točivé pole statoru též skokem změní svůj směr. Rotor se však vlivem svého momentu setrvačnosti a též vlivem momentu setrvačnosti připojené mechanické zátěže nemůže začít ihned točit na opačnou stranu. Proto se po jistou dobu ještě točí ve směru původním, brzdí a po zastavení se roztočí na opačnou stranu. Tomuto stavu se říká **brzdění protiproudem** nebo **reverzace**.

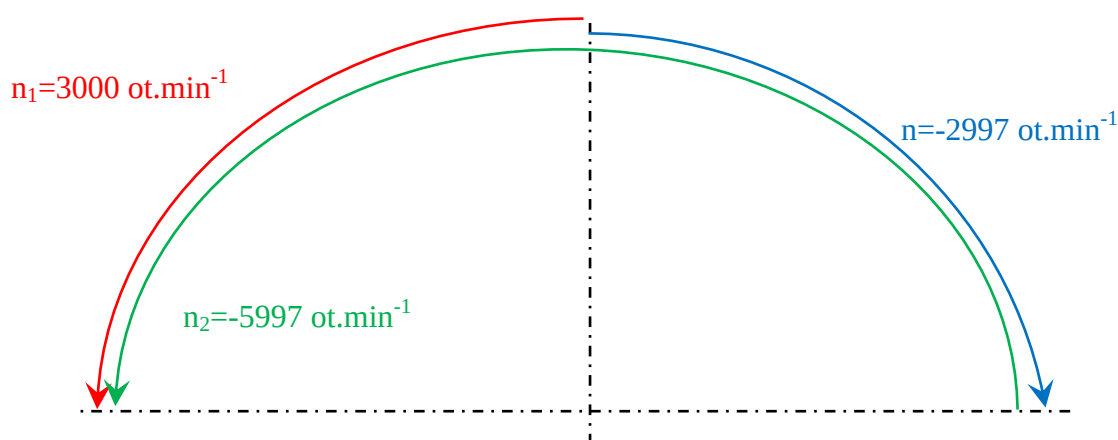
$$n_1 = 3000 \text{ ot. min}^{-1} \quad (10.23)$$

$$n = -2997 \text{ ot. min}^{-1} \quad (10.24)$$

Záporná rychlost n znamená, že se rotor otáčí proti směru statorového točivého pole.

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{3000 - (-2997)}{3000} = 1,999 \cong 2 \text{ (-)} \quad (10.25)$$

Skluz je téměř 2.



Obr. 10-7 První okamžik reverzace.

Záporná rychlost n_2 znamená, že rotorové točivé pole se pohybuje proti směru mechanické rychlosti rotoru.

10.4 Vztah mezi otáčivou rychlostí n a úhlovou rychlostí ω

Běžně používáme veličinu otáčivá rychlost

$$n \text{ (ot.min}^{-1}\text{)} \quad (10.26)$$

Do fyzikálních vzorců však musíme zásadně používat rychlost úhlovou

$$\omega \text{ (rad.s}^{-1}\text{)} \quad (10.27)$$

Její jednotky mohou být také uvedeny bez radiánů, tj.

$$\omega \text{ (s}^{-1}\text{)} \quad (10.28)$$

Fyzikálním vzorcem může být např. výpočet mechanického výkonu na hřídeli stroje (a to i neelektrického, např. spalovacího vznětového) motoru.

$$P = M\omega \text{ (W)} \quad (10.29)$$

Pokud však potřebujeme vypočítat tento výkon na hřídeli z údaje otáčivé rychlosti, potřebujeme nutně přepočet mezi rychlostí n (ot.min⁻¹) a ω (rad.s⁻¹).

Víme, že platí

$$\omega = 2\pi f \quad (10.30)$$

Pokud nyní budeme frekvenci f (Hz) považovat za „mechanickou veličinu“, bude vyjadřovat počet „mechanických period“ (tj. mechanických otáček) za sekundu. Proto ji v tomto smyslu přeznačíme na

$$f(\text{Hz}) = n_{\text{sec}} (\text{ot. s}^{-1}) \quad (10.31)$$

a použitím ve vztahu pro úhlovou rychlost obdržíme

$$\omega = 2\pi f = 2\pi n_{\text{sec}} \quad (10.32)$$

Nyní už jen nahradíme „sekundové otáčky“ – tj. počet otáček za sekundu – rychlostí v otáčkách za minutu, což je hodnota 60x větší. Aby se rovnost nezměnila, musíme proto „minutové otáčky“ – tj. počet otáček za minutu – vydělit 60.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi n_{\text{sec}} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30} \quad (10.33)$$

Otázky k tématu:



- Jakou synchronní rychlost bude mít 10pólový stroj na síti 50Hz?
- Jaký skluz má asynchronní stroj na síti 50Hz, pokud má jmenovitou rychlost 1460 ot.min⁻¹?
- Jaký kmitočet bude mít napětí indukované do rotoru stroje v prvním okamžiku po změně sledu fází, pokud má stroj rychlost 1490 ot.min⁻¹ na síti 50 Hz?
- Jaký výkon na hřídeli má motor elektrokola při rychlosti 1,5 ot.s⁻¹ a momentu 15Nm ?



Správné odpovědi

- Jakou synchronní rychlost bude mít 10pólový stroj na síti 50Hz?

Rychlost stroje vypočítáme podle vzorce

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} = \frac{50 \cdot 60}{5} = 600 \text{ ot. min}^{-1} \quad (10.34)$$

- Jaký skluz má asynchronní stroj na síti 50Hz, pokud má jmenovitou rychlost 1460 ot.min⁻¹?

Skluz určíme podle vztahu

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1460}{1500} = 0,027(-) \quad (10.35)$$

10 Rychlosti v asynchronním stroji

Do kterého dosadíme rychlost podle tabulky $n_1=1500 \text{ ot.min}^{-1}$.

- Jaký kmitočet bude mít napětí indukované do rotoru stroje v prvním okamžiku po změně sledu fází, pokud má stroj rychlost 1490 ot.min^{-1} na síti 50 Hz?

Skluz určíme ze vztahu

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - (-1490)}{1500} = 1,993(-) \quad (10.36)$$

a kmitočet v rotoru bude pak

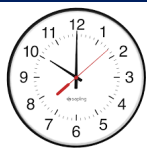
$$f_2 = s f_1 = 1,993 \cdot 50 = 99,7 \text{ (Hz)} \quad (10.37)$$

- Jaký výkon na hřídeli má motor elektrokola při rychlosti $1,5 \text{ ot.s}^{-1}$ a momentu 15Nm ?

Nejprve převedeme jednotky rychlosti z $n_{\text{sec}} = 1,5 \text{ ot.s}^{-1}$ na $n = 1,5 \times 60 = 90 \text{ ot.min}^{-1}$. Výkon pak určíme ze vztahu

$$P = M\omega = M \frac{\pi n}{30} = 15 \frac{\pi 90}{30} = 141,3 \text{ (W)} \quad (10.38)$$

11 Náhradní schéma asynchronního stroje



Předpokládaný čas: 35 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o výhodách a nevýhodách náhradního schéma asynchronního stroje a jeho podobnosti s transformátorem
- Umět popsat problematiku proměnného kmitočtu v rotoru
- Vědět, jak se vypočítá v náhradním schéma mechanický výkon motoru
- Umět vysvětlit vztah pro velikost indukovaného napětí do rotoru
- Umět charakterizovat rovnice náhradního schéma asynchronního motoru.
- Umět vysvětlit odvození momentové rovnice z náhradního schéma asynchronního motoru a její úpravu na použitelný tvar

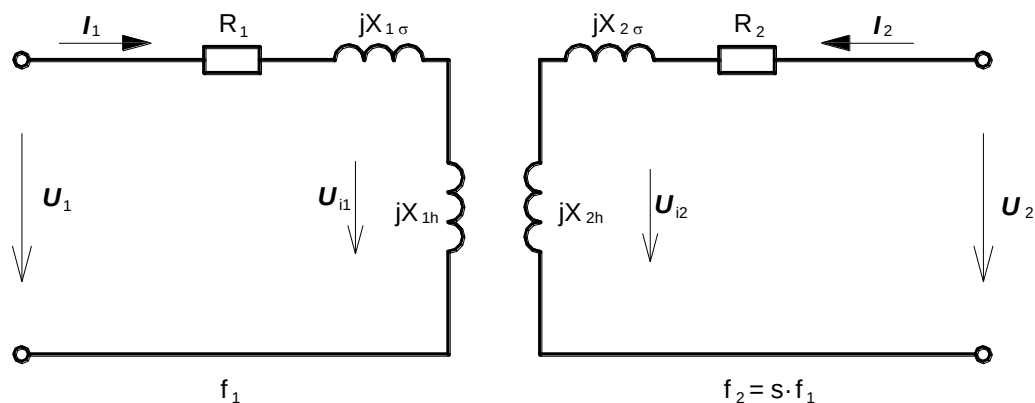
Náhradní schéma asynchronní stroje je velice podobné náhradnímu schématu transformátoru. Stator stroje je totiž napájen stejným napětím, jako transformátor. Dále jsou zde však již jisté rozdíly, které si musíme uvědomovat, přestože na první pohled je náhradní schéma podobné:

- Asynchronní stroj má na rozdíl od transformátoru vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem – to významně zvyšuje velikost rozptylových reaktancí v podélné větvi. Proto jednak roste magnetizační proud a jednak nelze zanedbávat příčnou větev ani v chodu nakrátko.
- Rotor má kmitočet indukovaného napětí shodný se statorem pouze pokud je v klidu (okamžik připojení na síť). Pak už je kmitočet proměnný.
- Počet fází rotoru je $m_2=3$ pouze u vinutého rotoru, u klece nakrátko je $m_2>m_1$
- Výstupem stroje je mechanický výkon na hřídeli. Ten však musíme nahradit vhodným elektrickým výkonem v náhradním schématu, protože to obsahuje jen elektrické parametry.

11.1 Náhradní schéma asynchronního stroje

Náhradní schéma opět platí – podobně jako u transformátoru – pro

- Napájení harmonickým proudem
- Ustálený stav
- Je vztaženo na jednu fázi
- Pro vícefázové stroje platí pro symetrické zatížení a symetrické napájení



Obr. 11-1 Výchozí náhradní schéma

Toto náhradní schéma můžeme popsat napěťovými rovnicemi

$$\overline{U_1} = (R_1 + jX_{1\sigma})\overline{I_1} + \overline{U_{i1}} \quad (11.1)$$

$$\overline{U_2} = (R_2 + jsX_{2\sigma})\overline{I_2} + \overline{U_{i2}} \quad (11.2)$$

Všimněte si, že na rotoru máme kmitočet nikoliv f_1 , ale f_2 a ten je daný vztahem

$$f_2 = s f_1 \quad (11.3)$$

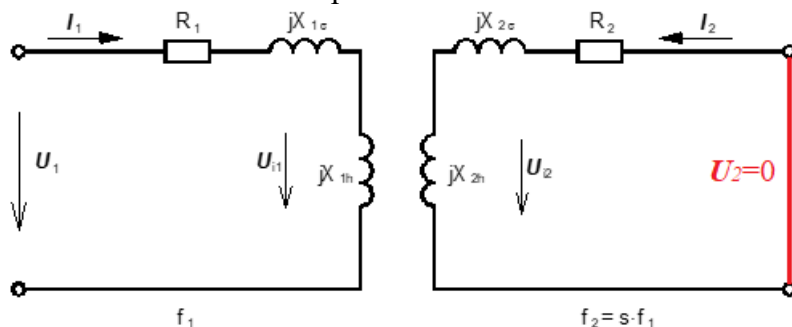
Protože na rotoru je rozptylová indukčnost $L_{2\sigma}$ a jí přísluší reaktance

$$X_{2\sigma} = \omega_2 L_{2\sigma} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} \quad (11.4)$$

Tímto postupem jsem si proměnný rotorový kmitočet vyjádřili pomocí kmitočtu statoru f_1 a skluzu. Abychom však jako v případě transformátoru mohli propojit statorový i rotorový obvod a získat tak náhradní schéma ve tvaru „T“ článku, musíme rotorový obvod převést na shodný kmitočet. Uděláme to tak, že rovnici (11.2) skluzem vydělíme. Každý člen rovnice musíme dělit skluzem.

$$\frac{\overline{U_2}}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \overline{I_2} + \frac{\overline{U_{i2}}}{s} \quad (11.5)$$

Nyní si musíme uvědomit, že asynchronní stroj musí mít rotor stále spojen dokrátka, jinak nedorazí k vytvoření rotorového točivého pole a moment nevznikne.



Obr. 11-2 Rotor nakrátko.

Rovnice se proto v levé části podstatně zjednoduší

$$0 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \bar{I}_2 + \frac{\overline{U_{i2}}}{s} \quad (11.6)$$

Odpor R_2 se chová shodně pro jakýkoliv kmitočet, zde nám proto jeho závislost na kmitočtu není nepříjemná. U rozptylové reaktance závislost na kmitočtu byla odstraněna. Nyní si vysvětleme vztah

$$U_{i2} = s U_{i20} \quad (11.7)$$

a související obr. 9.4. Do každé tyče se indukují velikost napětí U_{i2} , které je však závislé na rychlosti stroje. Pokud si budeme definovat velikost napětí pro rotor vinutý a rozpojený, které je v klidu jako U_{i20} , bude tam toto napětí pro $s=1$.

$$U_{i2} = s U_{i20} = 1 \cdot U_{i20} = U_{i20} \quad (11.8)$$

Pokud by se stroj točil synchronní rychlostí a skluz by byl $s=0$, pak by se do rotoru neindukovalo žádné napětí

$$U_{i2} = s U_{i20} = 0 \cdot U_{i20} = 0 \quad (11.9)$$

Proto ze vztahu (11.7) můžeme vyjádřit

$$U_{i2} = s U_{i20} \rightarrow U_{i20} = \frac{U_{i2}}{s} \quad (11.10)$$

Tím můžeme rovnici (11.6) zjednodušit i na první straně

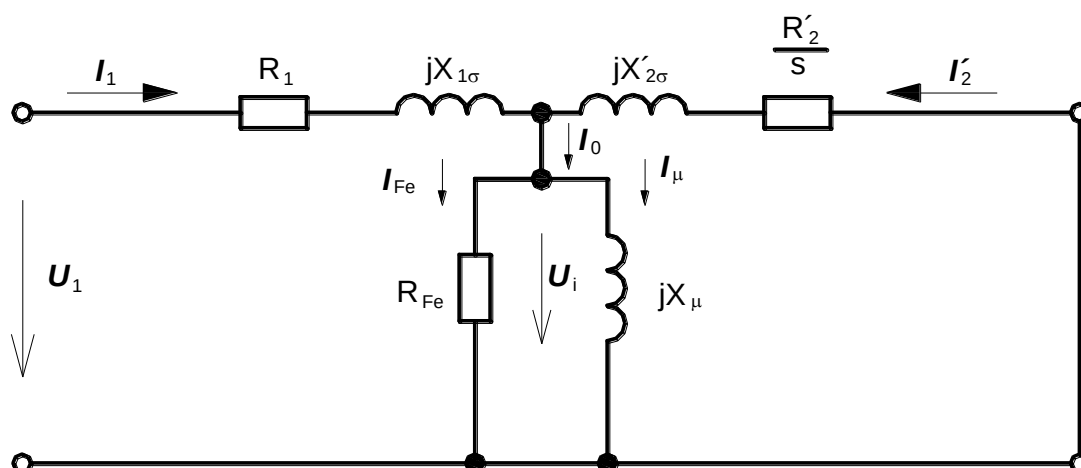
$$0 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \bar{I}_2 + \frac{\overline{U_{i2}}}{s} = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \bar{I}_2 + \overline{U_{i20}} \quad (11.11)$$

takže máme

$$0 = \left(\frac{R_2}{s} + jX_{2\sigma} \right) \bar{I}_2 + \overline{U_{i20}} \quad (11.12)$$

Dále musíme v náhradním schéma zavést převod veličin z rotoru na stator. Podobně jsme převáděli u transformátoru i veličiny ze sekundáru na primár. Zde je určení převodu poněkud komplikovanější, takže jej zde řešit nebudeme.

Pak již můžeme nakreslit náhradní schéma ve tvaru „T-článku“. Do příčné větve doplníme opět prvek R_{Fe} , který nahrazuje podobně jako u transformátoru ztráty v magnetickém obvodu. Zde však přibývají ještě i ztráty mechanické.



Obr. 11-3 Náhradní schéma ve tvaru „T-článku“.

11.2 Mechanický výkon v náhradním schéma

Zbývá však ještě vyřešit mechanický výkon na hřídeli stroje. Kde jej v náhradním schéma lze vypočítat, určit?

Ztráty ve vinutí rotoru jsou dány vztahem

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2'^2 \quad (11.13)$$

Tento vztah je však v praxi použitelný dobře jen pro stroje s kroužkovou kotvou. Pro klec nakrátko neznáme proudy a ani počet fází, protože záleží na počtu drážek rotoru a počtu pólů stroje. To by znamenalo demontáž rotoru nebo znalost výrobní dokumentace. Pro kotvu nakrátko však lze snadno použít přepočítané veličiny z rotoru na stator. Z náhradního schéma transformátoru víme, že

$$R_1 = R_2' \quad (11.14)$$

a také

$$I_1 = I_2' \quad (11.15)$$

Stejně je tomu i asynchronního stroje. Takže použitím přepočtených veličin z rotoru na stator můžeme použít známý statorový počet fází m_1

$$\Delta P_{j2} = m_2 R_2 I_2'^2 = m_1 R_2' I_2'^2 \quad (11.16)$$

Nyní si určíme celkový činný výkon v rotoru z náhradního schéma. Je to výkon na prvku Sem zadejte rovnici.

11.3 Momentová rovnice asynchronního stroje

Pro odvození momentové rovnice vyjdeme z náhradního schéma stroje. Jeho činný příkon je

$$P_p = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi \quad (11.17)$$

11 Náhradní schéma asynchronního stroje

Tento mechanický příkon se změní na mechanický výkon a částečně též na ztráty, resp. teplo. Na hřídeli máme mechanický výkon

$$P = M\omega = M(1-s)\omega_1 \quad (11.18)$$

V předchozím odstavci jsme určili prvek náhradního schéma, na kterém je ekvivalentní výkon elektrický, stejný jako výkon mechanický na hřídeli. Tímto prvkem je v rotorové části rezistor o velikosti odporu

$$\frac{1-s}{s} R'_2 \quad (11.19)$$

Na tomto prvku - rezistoru jsem proto Joulovy ztráty stejně velké, jako mechanický výkon. Tyto Joulovy ztráty na rezistoru o odporu R jsou obecně dány vztahem

$$RI^2 \quad (11.20)$$

Nyní však musíme použít místo „ R “ stanovenou velikost prvku, tj. výraz bude

$$\frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2 \quad (11.21)$$

A musíme jej ještě vynásobit počtem satorových fází. To proto, že používáme veličiny rotorové převedené na stator.

$$m_1 \frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2 \quad (11.22)$$

Tímto vztahem je v náhradním schéma dán mechanický výkon na hřídeli. Proto se musejí oba vztahy (11.18) a (11.22.) sobě rovnat

$$M(1-s)\omega_1 = m_1 \frac{1-s}{s} R'_2 I_2'^2 \quad (11.23)$$

Odtud pak vyjádříme moment

$$M = \frac{m_1}{s \omega_1} R'_2 I_2'^2 \quad (11.24)$$

Tento vztah se však může použít jen „problematicky“. Protože je skluz s ve jmenovateli, tak pro $s \rightarrow 0$ je $M \rightarrow \infty$

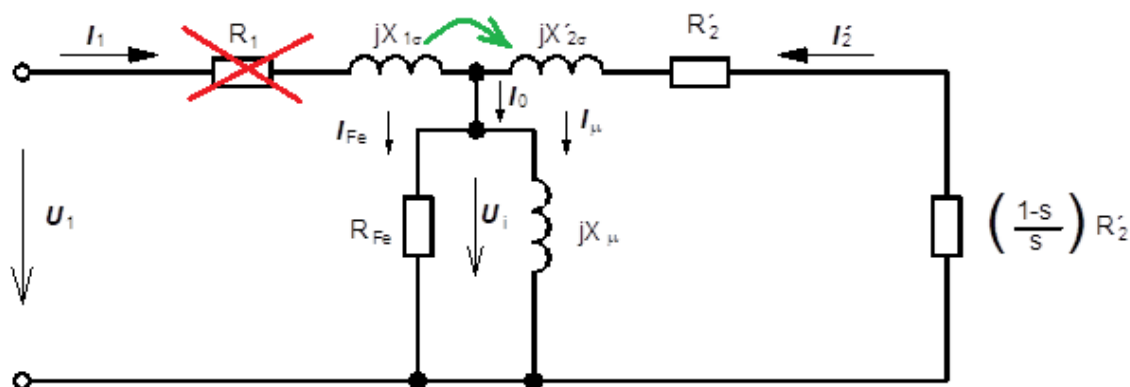
a nikoliv nula, jak uvádí momentová charakteristika. Výpočet momentu pomocí tohoto vztahu by byl v simulacích obtížně použitelný, výpočet by zkolaboval nebo ukázal výsledek NaN („not a number“). Ve skutečnosti je pro nulový skluz také nulový proud I_2 , ale to situaci také neřeší, protože výraz typu $0/0$ je neurčitý.

Aby bylo možné výraz používat pro simulace, uděláme následující kroky:

- Upravíme – zjednodušíme – náhradní schéma
- Z takto zjednodušeného schéma vyjádříme rotorový proud $I_2'^2$
- Rotorový proud dosadíme do výše uvedeného problematického vztahu

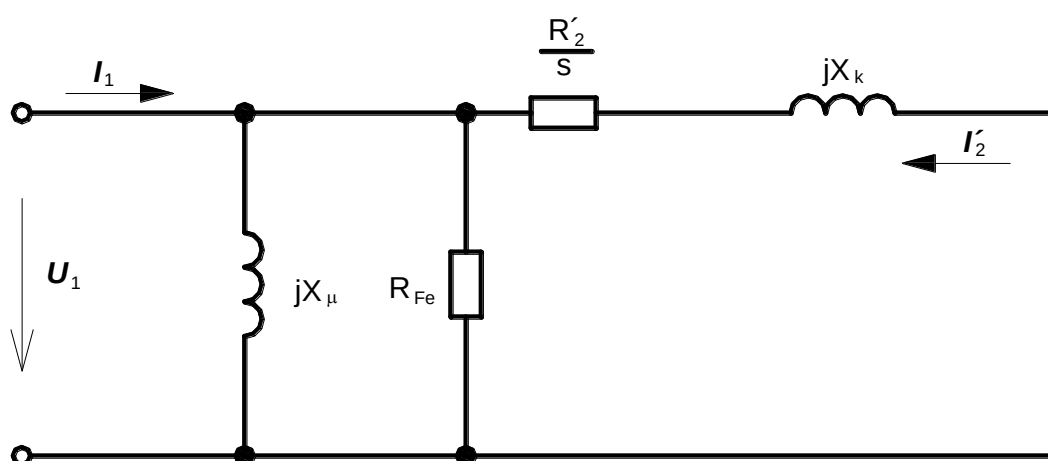
Nejprve v náhradním schéma zanedbáme odpor satorového vinutí. To lze bez velké chyby udělat pro stroje s výkonem $P > 10$ kW. Dále v náhradním schéma přesuneme rozptylovou reaktanci až za příčnou větev. Tím se sice dopustíme vědomě jisté nepřesnosti, ale tato nepřesnost je akceptovatelná. Výhodou je nezávislost proudu příčné větve na zatížení stroje. Příčná větev je totiž připojena po těchto dvou zásazích přímo na napájecí napětí.

11 Náhradní schéma asynchronního stroje



Obr. 11-4 Úpravy náhradního schéma

Výhodou je nezávislost proudu příčné větve na zatížení stroje. Příčná větev je totiž připojena po těchto dvou zásazích přímo na napájecí napětí. Náhradní schéma je pak zjednodušeno takto:



Obr. 11-5 Zjednodušené náhradní schéma

Všimněte si, že rozptylová reaktance statoru (která byla přesunuta za příčnou větev, tj. do obvodu rotoru) nezmizela, ale je zahrnuta společně s rozptylovou reaktancí rotoru v reaktanci

$$jX_k = jX_{1\sigma} + jX'_{2\sigma} \quad (11.26)$$

Tím máme splněn první bod a přistoupíme k druhému kroku, tj. vyjádříme rotorový proud. To je díky zjednodušení schéma celkem snadné. Proud je jednoduše

$$I = \frac{U}{Z} \quad (11.27)$$

kam za impedanci dosadíme parametry rotoru

$$Z = \sqrt{\left(\frac{R'_2}{s}\right)^2 + (X_k)^2} \quad (11.28)$$

Podle naznačeného postupu v druhém bodu vidíme, že bude potřeba vyjádřit a dosadit druhou mocninu proudu. To se nám hodí, protože tím se zruší odmocnina v impedanci Z.

$$I_2' = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_k)^2}} \quad (11.29)$$

Proud v druhé mocnině proto bude

$$I_2'^2 = \frac{U^2}{Z^2} = \frac{U^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_k)^2} \quad (11.30)$$

Nyní provedeme poslední třetí krok, a to dosadíme $I_2'^2$ do „problematické“ rovnice (11.24)

$$M = \frac{m_1}{s \omega_1} R_2' I_2'^2 = \frac{m_1}{s \omega_1} R_2' \frac{U^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_k)^2} \quad (11.31)$$

To ještě upravíme

$$M = \frac{m_1}{s \omega_1} R_2' \frac{U^2}{\left(\frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_k)^2} = \frac{m_1}{\omega_1} R_2' \frac{s U^2}{(R_2')^2 + (s X_k)^2} \quad (11.32)$$

Otázky k tématu:



- Jaké jsou rozdíly mezi náhradním schématem transformátoru a asynchronního motoru?
- Jak se projevuje vliv vzduchové mezery na magnetizačním proudu motoru? Porovnej s transformátorem.
- Pokud má 3f asynchronní stroj jmenovité rotorové napětí 145V, jaké bude napětí na brzdných odporech v okamžiku zahájení brzdění protiproudem?
- Jak se projeví generátorický chod stroje na síti v prvcích náhradního schéma?



Správné odpovědi

- Jaké jsou rozdíly mezi náhradním schématem transformátoru a asynchronního motoru?

Asynchronní stroj má na rozdíl od transformátoru vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem – to významně zvyšuje velikost rozptylových reaktancí v podélné větvi. Proto jednak roste magnetizační proud a jednak nelze zanedbávat příčnou větev ani v chodu nakrátko.

Rotor má kmitočet indukovaného napětí shodný se statorem pouze pokud je v klidu (okamžik připojení na síť). Pak už je kmitočet proměnný.

Počet fází rotoru je $m_2=3$ pouze u vinutého rotoru, u klece nakrátko je $m_2>m_1$

Výstupem stroje je mechanický výkon na hřídeli. Ten však musíme nahradit vhodným elektrickým výkonem v náhradním schématu, protože to obsahuje jen elektrické parametry.

11 Náhradní schéma asynchronního stroje

- Jak se projevuje vliv vzduchové mezery na magnetizačním proudu motoru? Porovnej s transformátorem?

Vzduchová mezera má za důsledek větší rozptylové reaktance a zejména nárůst magnetizačního proudu stroje. Pokud je u transformátoru magnetizační proud v poměrné hodnotě jen asi 1-10%, je u asynchronního stroje 40-60%.

- Pokud má 3f asynchronní stroj jmenovité rotorové napětí 145V, jaké bude napětí na brzdných odporech v okamžiku zahájení brzdění protiproudem?

Sdružené jmenovité napětí 145V je na rotoru pro stroj v klidu, tj. pro $s=1$. Pro první okamžik brzdění protiproudem může být skluz až $s=2$. Podle rovnice

$$U_{i2} = s U_{i20} \quad (11.33)$$

bude po dosazení v nejnepříznivějším případě napětí dvojnásobné, tj.

$$U_{i2} = s U_{i20} = 2 \cdot 145 = 290V \quad (11.34)$$

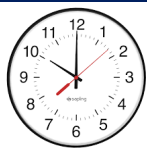
Ve skutečnosti bude napětí nižší, protože:

- Skluz bude poněkud nižší
- Na rotorové rozptylové reaktanci bude úbytek napětí způsobený rotorovým proudem

- Jak se projeví generátorický chod stroje na síti v prvcích náhradního schéma?

Na rotorovém prvku $\frac{R'_2}{s}$ bude vlivem záporného skluzu vznikat výkon, tj. odpor bude „záporný“.

12 Momentová charakteristika stroje



Předpokládaný čas: 25 min

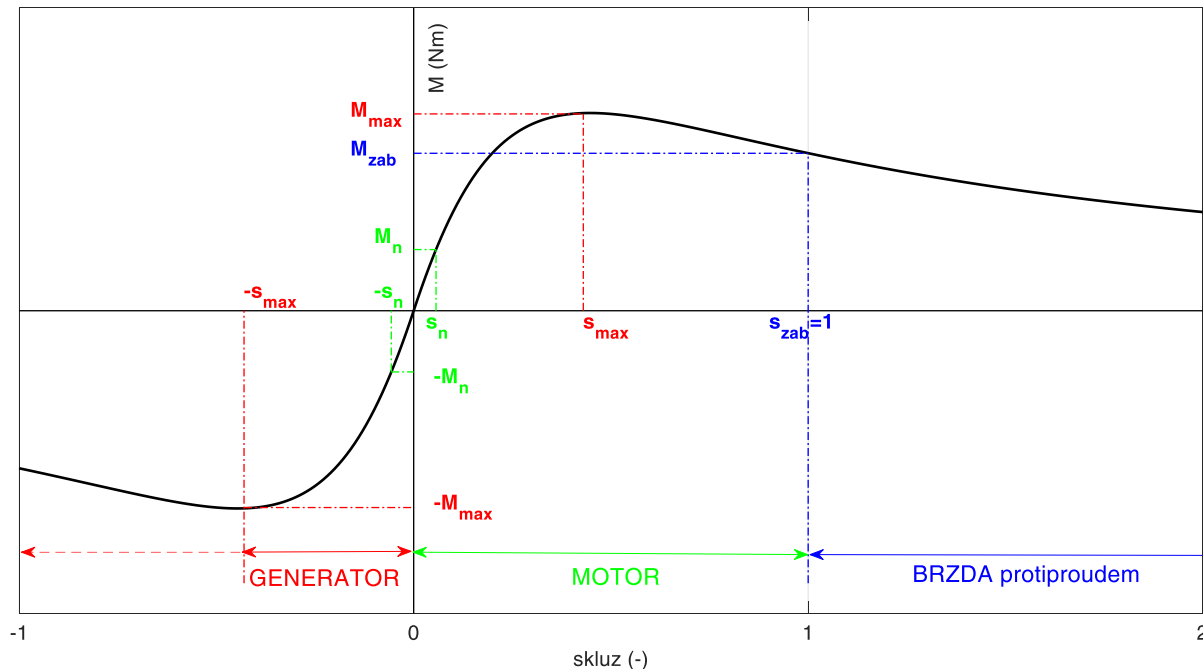


Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o tvaru momentové charakteristiky
- Umět popsat významné body na momentové charakteristice
- Vědět, jak se momentová charakteristika zobrazuje pro skluz, rotorový kmitočet a rychlost stroje.
- Umět charakterizovat stabilní a labilní části charakteristiky
- Umět charakterizovat režimy práce stroje MOTOR – GENERÁTOR – BRZDA.
- Umět vysvětlit princip a rozbor Klossova vztahu.

12.1 Momentová charakteristika asynchronního stroje

V předchozí kapitole jsme dospěli k rovnici pro momentovou charakteristiku. Tato charakteristika je nakreslena pro závislost momentu na skluzu na následujícím obrázku.



Obr. 12-1 Momentová charakteristika v závislosti na skluzu

Tato charakteristika platí obecně.

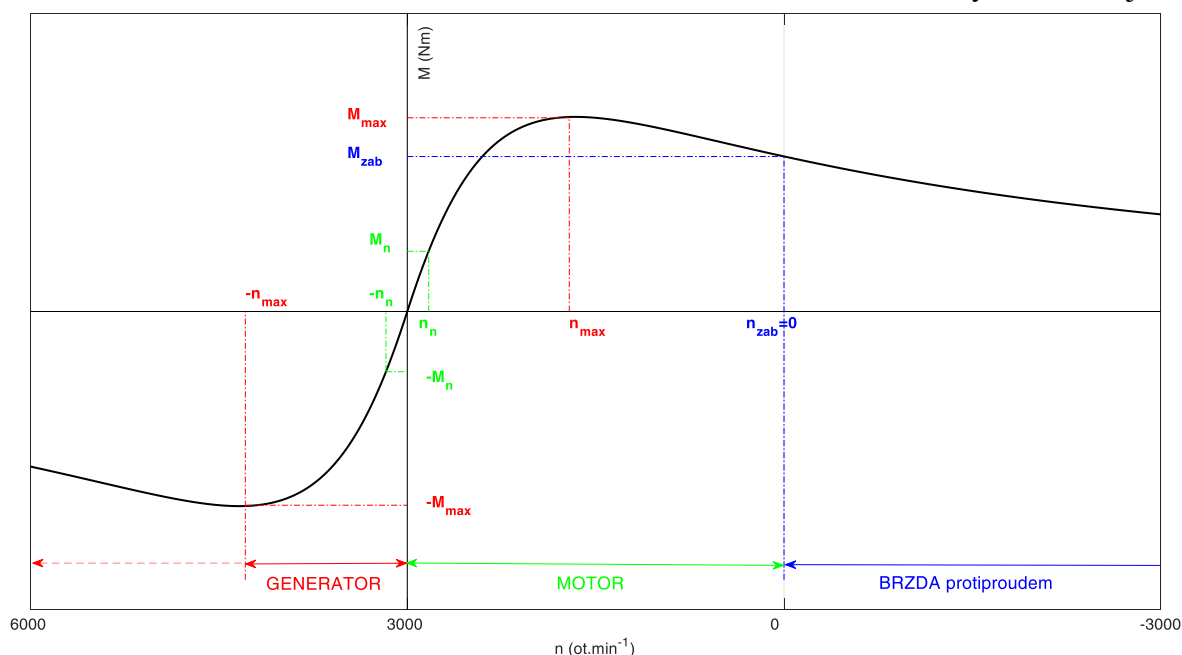
Skládá se ze stabilní části a labilní části. Stabilní část je tvořena přibližně přímkovou částí charakteristiky a to mezi momenty $-M_{\max}$ až do $+M_{\max}$. Ve stabilní části se nachází pracovní

12 Momentová charakteristika asynchronního stroje

oblast stroje. Ta je ohraničena jmenovitými momenty pro motorický a generátorický stav. Stroj zde může pracovat trvale.

Labilní část je tvořena oběma větvemi hyperboly, a to mezi skluzy $-\infty$ do $-s_{\max}$ a mezi $+s_{\max}$ do $+\infty$. Použitelná je však prakticky podstatně menší oblast skluzů. Stroj zde trvale pracovat nemůže a proto se snaží tuto oblast opustit. Pokud se v labilní části stroj vyskytne při zapnutí na síť ($s=1$), nastane rozběh. Pokud se v motorické labilní části ocitne stroj vlivem přetížení, nastane jeho zastavení a musíme jej vypnout, aby nedošlo k jeho zničení. Pokud stroj uvedeme do labilní části vlivem změny sledu fází, stroj brzdí a pokud jej neodpojíme od sítě při zastavení, nastane jeho nový rozběh do stabilní části momentové charakteristiky, ovšem na opačnou stranu chodu.

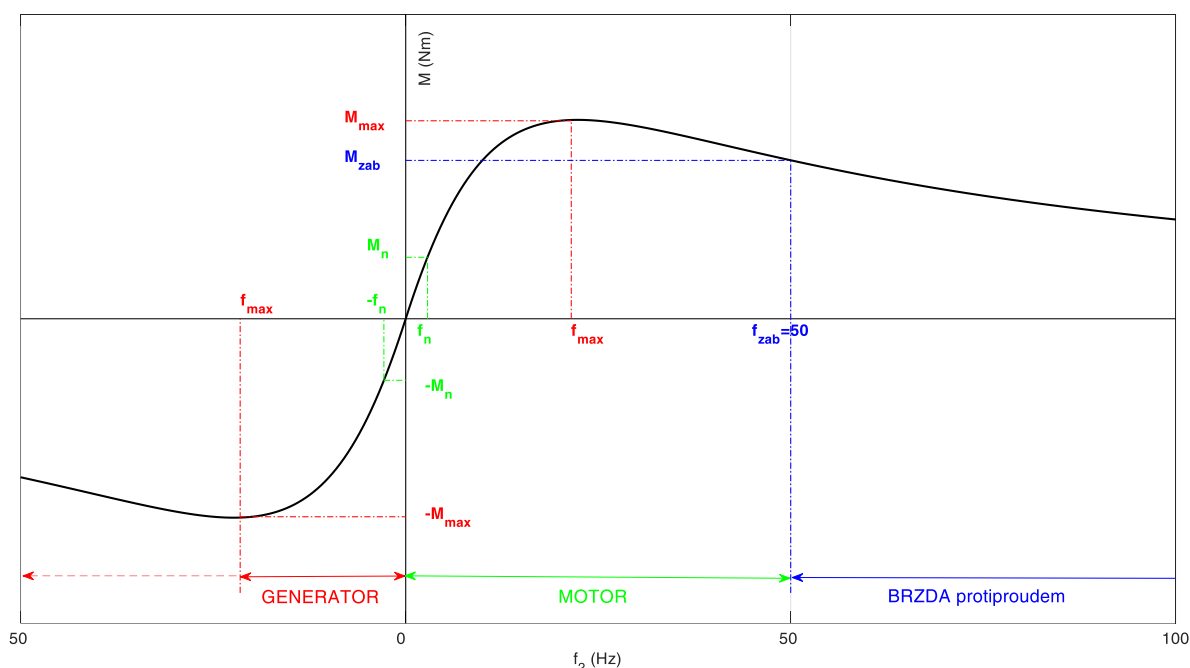
Tutěž momentovou charakteristiku si můžeme nakreslit také v závislosti na rychlosti stroje.



Obr. 12-2 Momentová charakteristika v závislosti na rychlosti stroje

Vidíme, že měřítko osy rychlosti je opačně orientováno a navíc posunuto vzhledem ke stupnici skluzu.

Do třetice si tutěž momentovou charakteristiku si můžeme nakreslit v závislosti na rotorovém kmitočtu indukovaného napětí do stroje.



Obr. 12-3 Momentová charakteristika v závislosti na kmitočtu f_2 v rotoru stroje

12.2 Klossův vztah

Pro první přiblížení lze momentovou charakteristiku popsat pomocí tzv. Klossova vztahu. Ten lze dobře použít v okolí jmenovitých momentů. Pro větší skluzu se již moment určený pomocí Klossova vztahu odlišuje od reality.

Důvodem je

- Závislost rotorového odporu R_2 na kmitočtu vlivem povrchového jevu
- Pro velké stroje se oprávněně zanedbává satorový odpor R_1 , což pro malé stroje představuje příliš velké zjednodušení a tím také velkou chybu

Jednoduchý Klossův vztah je

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{max}} + \frac{s_{max}}{s}} \quad (12.1)$$

kde je

M	moment v daném bodě charakteristiky
s	skluz v daném bodě momentové charakteristiky
M_{max}	maximální moment na charakteristice
s_{max}	skluz maximálního momentu

Jeho použití budeme nejprve diskutovat v okolí jmenovitého zatížení, tj. pro skluzu kolem nuly a jmenovitých hodnot s_n . Proto můžeme napsat, že

$$s \ll s_{max} \quad (12.2)$$

Proto můžeme zanedbat celý první člen – zlomek - ve jmenovateli

12 Momentová charakteristika asynchronního stroje

$$\frac{s}{s_{max}} \rightarrow 0 \quad (12.3)$$

a proto se celý Klossův vztah změnil na tvar

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s_{max}}{s}} \quad (12.4)$$

a to je možné přepsat na tvar

$$M = \frac{2 M_{max}}{\frac{s_{max}}{s}} = \frac{2 s M_{max}}{s_{max}} \quad (12.5)$$

Pokud budeme proto zvětšovat skluz s , bude se zvětšovat i moment M . Jedná se proto o rovnici přímky.

Nyní se podívejme na stav, kdy skluz bude větší než skluz momentu zvratu, tj.

$$s \gg s_{max} \quad (12.6)$$

Proto můžeme zanedbat celý druhý člen - zlomek - ve jmenovateli

$$\frac{s_{max}}{s} \rightarrow 0 \quad (12.7)$$

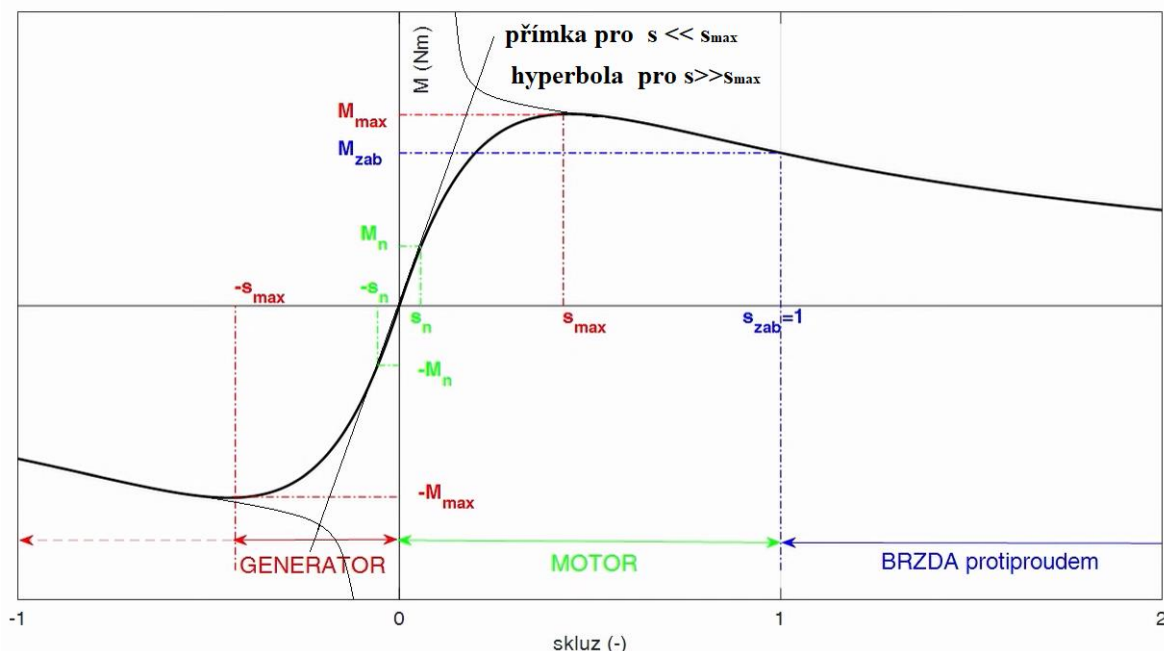
a proto se celý Klossův vztah změnil na tvar

$$\frac{M}{M_{max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{max}}} \quad (12.8)$$

a to je možné přepsat na tvar

$$M = \frac{2 M_{max}}{\frac{s}{s_{max}}} = \frac{2 s_{max} M_{max}}{s} \quad (12.9)$$

Pokud budeme nyní skluz s zvětšovat, bude moment M klesat. Jedná se o rovnici hyperboly. Obě křivky, jak přímka, tak obě větve hyperboly, jsou zakresleny v momentové charakteristice.



Obr. 12-1 Momentová charakteristika a křivky hyperboly + přímky. Charakteristika pro malý motor $P=3\text{kW}$.



Otázky k tématu:

- V jaké části momentové charakteristiky je umístěn jmenovitý bod asynchronních strojů?
- V jakém bodě momentové charakteristiky nastává připojení asynchronního stroje v klidu k síti?
- Z fyzikálního hlediska brždění protiproudem je limitováno skluzem $s=2$?



Správné odpovědi

- V jaké části momentové charakteristiky je umístěn jmenovitý bod asynchronních strojů?

Jmenovitý bod je v lineární (stabilní) části momentové charakteristiky. Buď pro motorický nebo generátorický režim.

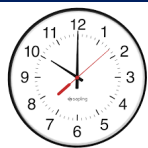
- V jakém bodě momentové charakteristiky nastává připojení asynchronního stroje v klidu k síti?

Jedná se o záběrný moment pro $s=1$.

- Z fyzikálního hlediska brždění protiproudem je limitováno skluzem $s=2$?

Nikoliv, fyzikálně stroj pracuje jako brzda do skluzů i vyšších než 1. Prakticky jsou však vyšší skluzu nedosažitelné.

13 Způsoby spouštění motorů



Předpokládaný čas: 150 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o základních ukazatelích spouštění motorů
- Umět popsat a definovat jakost spouštění
- Vědět, jaké jsou výhody a nevýhody i možnosti a limity spouštění přímým připojením do sítě
- Umět vyjmenovat způsoby omezení záběrného proudu
- Umět charakterizovat způsoby snížení napětí pro rozběh asynchronního stroje
- Umět vysvětlit rozdíly v chování a charakteristikách mechanické zátěže.
- Mít přehled o principu a vlastnostech spouštění Y-D, ATR, TL, SOFT-STARTem, stroje s vinutým rotorem a speciální kotvou.

Požadavky na rychlost a plynulost rozběhu stanovují vlastnosti spouštěcího zařízení. Je potřeba zajistit např. omezení rázů v potrubí čerpadel, rozjezd výtahů, nepřekročit adhezi kolejových vozidel apod.). Proudové rázy v síti u strojů větších výkonů jsou primární záležitostí.

13.1 Základní ukazatele spouštění motorů

Záběrný proud

Záběrný proud je obvykle asi $I_{záb} = (6 \div 8) I_n$, přičemž je snaha omezit tento proud na hodnotu max. $5I_n$. Způsobuje značné elektromagnetické síly, jimiž jsou ohrožována zejména čela vinutí stroje. Navíc při častém spouštění může nebezpečně vzrůst teplota vinutí. Běžné asynchronní motory pro všeobecné použití umožňují asi 5-7 rozběhů za hodinu. Pakliže vlivem velkého záběrného proudu nastane pokles napájecího napětí (úbytek napětí na vedení, měkká síť), projeví se to nepříznivým poklesem záběrného momentu.

Stanovuje se činitel záběrného proudu, definovaný jako

$$k_z = \frac{I_{záb}}{I_n} = 6 \div 8 (-) \quad (13.1)$$

Plynulost rozběhu

Plynulost rozběhu je důležitá zejména pro transportní zařízení, navíječky apod. Sleduje se zejména průběh $n=f(t)$, $s=f(t)$, $I=f(t)$.

Spouštění se zátěží

Spouštění se zátěží charakterizuje činitel k_M

$$k_M = \frac{M_{záb}}{M_n} (-) \quad (13.2)$$

Jde o poměr záběrného a jmenovitého momentu. Pro spolehlivý rozběh musí být záběrný moment vyšší než jmenovitý. Je nutné též pamatovat na zvýšení potřebného záběrného momentu např. při poklesu teplot, zaledování strojních mechanismů apod. Používání mechanických rozběhových spojek se snažíme vyhnout.

Doba rozběhu

Doba rozběhu $t_a(s)$ je sledována zejména u dopravních prostředků. Např. v lehké trakci - tramvaje mají předepsané dosažitelné zrychlení, kterého musí být schopny. V těžké trakci se jedná např. o lokomotivy (dobře patrné pro Pendolino), aby bylo možné dodržovat grafikon vlakové dopravy. Doba rozběhu je podstatná i pro jiné strojní mechanismy, např. roboty a výrobní linky, např. aby byl zajištěn plynulý pohyb materiálu.

Ztráty při rozběhu

Ztráty při rozběhu a s tím související oteplení stroje rozběhem. Toto teplo je nutné odvést chlazením. Zejména dopravní prostředky lehké trakce (tramvaje, trolejbusy) motor používají i pro provozní dynamické brzdění, což způsobuje opět ztráty a související nárůst teploty stroje. Na základě ztrát se pak určuje energetická spotřeba vozidla a tím i náklady na provoz a dopravu cestujících nebo materiálu.

Jednoduchost spouštění

Jednoduchost spouštění, cena a rozměr spouštěcího zařízení jsou podstatným parametrem pohonu, který ovlivňuje jeho cenu. Větší stroje (50 kW a více) jsou často zatěžovány momentem, který má ventilátorový charakter ($M \sim n^2$). Rozběh pak zpravidla problematický není. Pro spouštění výtahů a složitějších strojních mechanismů je potřeba např. spouštěcí tlumivka, kmitočtový měnič apod. Spouštěcí zařízení musí být dimenzováno nejen dle jmenovitého výkonu, ale i podle rozběhových proudů, počtu startů za hodinu apod.

Jakost spouštění

Jakost spouštění je poměr činitelů momentu a proudu při spouštění

$$g_s = \frac{k_M}{k_I} (-) \quad (13.3)$$

Slouží pro porovnání motorů s různou konstrukcí kotev. Kromě jiného závisí také na velikosti odporů a reaktancí v rotoru.

13.2 Přímé připojení k síti

Jedná se o nejjednodušší, nejlevnější a často také o nejspolehlivější spouštěcí zařízení. Představuje je zpravidla jen vačkový vypínač nebo stykač. Samozřejmostí je doplněné jištění proti zkratu a popř. další ochrany (přetížení, výpadek fáze, podpětí, přepětí, změna směru toku výkonu,...).

Při připojení napájecího napětí na statorové vinutí je rotor v klidu ($n=0$, $s=1$). Připojení a start stroje, který není v klidu je komplikovanější záležitost a nebude v tomto textu řešena. V prvním okamžiku je kmitočet proudů v rotoru roven kmitočtu napájecímu a motor se chová jako transformátor. Protože je však jeho rotorové vinutí spojeno nakrátko, vznikne proudový náraz a značný záběrný proud ¹

$$I_{záb} = (6 - 8)I_n \quad (13.4)$$

Proto lze přímým připojením k síti spouštět motory pouze tehdy, je-li alespoň přibližně splněna některá z následujících podmínek:

- Stroj má výkon do 3kW

¹ U transformátoru nakrátko by tento proud byl ještě vyšší, ale zde je omezen vzduchovou mezerou stroje a rozptylem.

Pro stroje s napětím 400V je jmenovitý proud přibližně dvojnásobkem hodnoty výkonu v kW. Pro stroj s výkonem $P=1,5$ kW je to přibližně $I_n=3$ A. Pak je záběrný proud v případě $I_{zab}=8I_n = 24$ A. Pokud máme hlavní domovní jistič C25A a při současném provozu dalších domácích spotřebičů (rychlavárna konvice 2kW, varná deska 4kW, pračka 2kW) může dojít k jeho nežádoucímu zapůsobení.

- Odběratel má vlastní transformátor

V tomto případě lze připojovat přímým připojením motory až do 50% zdánlivého výkonu transformátoru. Poklesy napětí v síti jsou problémem provozovatele stroje. Nadřazená síť (např. 22 kV) má podstatně vyšší zkratový výkon a poklesy napětí zde zpravidla nejsou tak výrazné.

- Při spouštění motoru nenastane větší pokles napětí než povolených 5% (resp. 10%, dle druhu sítě)

Menší dovolený pokles napětí je v obytných objektech, větší pokles napětí je dovolen v průmyslových objektech.

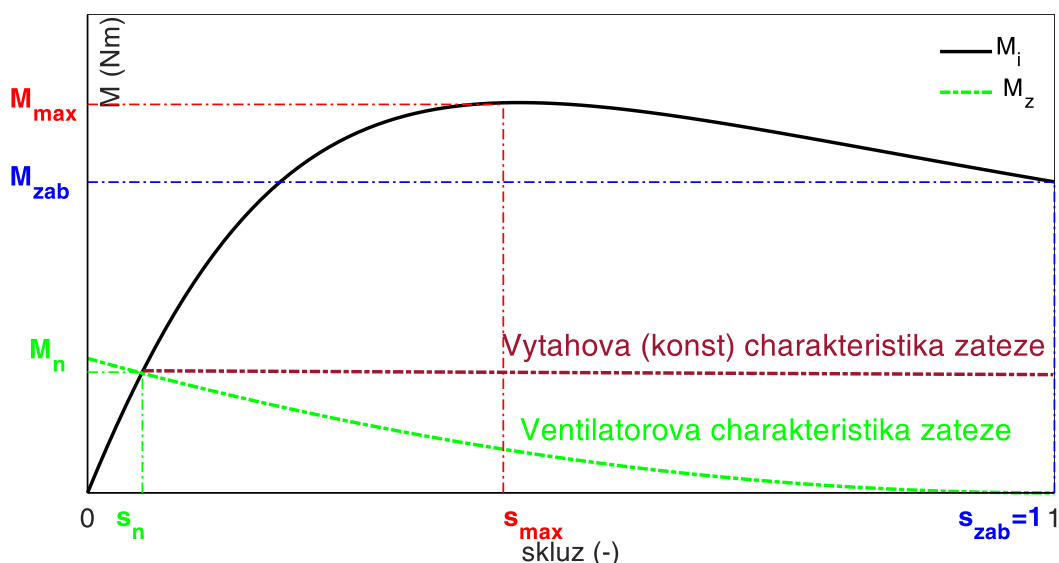
Výhodou tohoto způsobu spouštění je jednoduchost a na rozdíl od níže popsanych způsobů (na principu snížení napětí) i příznivé parametry momentové charakteristiky.

13.3 Spouštění sníženým napětím

Snížené napětí vždy způsobí pokles momentu, protože

$$M \sim U^2 \quad (13.5)$$

Proto se omezí záběrný proud a tím i nežádoucí pokles napětí v síti vlivem velkého záběrného proudu. Současně nastane kromě poklesu momentu i prodloužení doby rozběhu. Při rozběhu s mechanickou zátěží mohou nastat někdy problémy. Tento způsob je vhodný pro tzv. ventilátorovou charakteristiku zátěže, kde moment zátěže stoupá přibližně kvadraticky s rychlostí stroje.



Obr. 13-1 Momentová charakteristika zátěže, ventilátorová (kvadratická) a výtahová

Kromě ventilátorů jsou to také rotační a odstředivá čerpadla² nebo strojní zařízení, která sice nemají ventilátorovou charakteristiku, ale u kterých lze zajistit rozběh bez mechanické zátěže (okružní pila, kátr, z domácích spotřebičů např. travní sekačka, drtič zahradního odpadu, štěpkovač apod.).

Sníženého napětí lze dosáhnout zejména těmito způsoby:

- Přepínání Y-D
- Spouštěcí tlumivka
- Spouštěcí autotransformátor
- Soft-start

13.4 Přepínání Y-D

Při spojení vinutí do hvězdy je na každé fázi fázové napětí U_f a vinutím pak prochází stejný proud jako je proud v každém vodiči přívodního kabelu. Uzel stroje se sice nepřipojuje na střední pracovní vodič N sítě, ale přesto má nulové napětí vůči tomuto vodiči. To platí při symetrické souměrné síti a stroji. Výkon stroje je

$$P_Y = 3U_f I_f \quad (13.6)$$

Protože víme, že sdružené a fázové napětí má vztah

$$U_s = \sqrt{3}U_f \quad (13.7)$$

Můžeme tento výkon vyjádřit pomocí sdruženého napětí

$$P_Y = \sqrt{3}U_s I_f \quad (13.8)$$

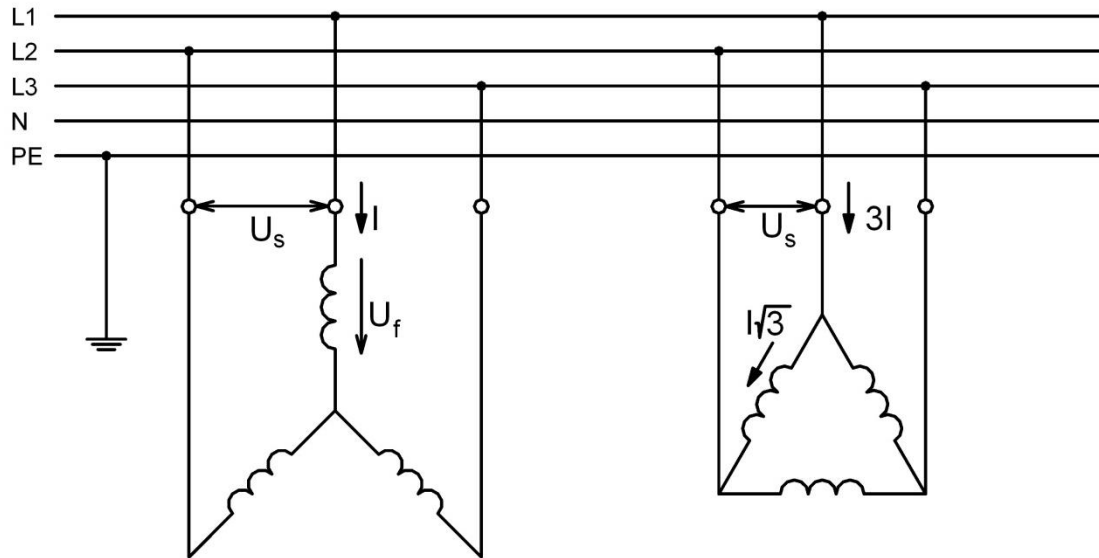
Po přepojení vinutí do trojúhelníka se na každé vinutí připojí napětí nikoliv fázové $U_f=230\text{V}$, ale sdružené $U_s=400\text{V}$. Toto napětí je $\sqrt{3}\times$ větší. Proto bude protékat vinutím také je $\sqrt{3}\times$ větší proud, tj. je $\sqrt{3}\times I_f$.

Výkon stroje bude pak opět trojnásobkem výkonu jedné fáze, tj. trojnásobkem součinu napětí na vinutí a proudu vinutím. Napětí na vinití je nyní U_s . Proud vinutím je nyní $\sqrt{3}\times I_f$. Takže výkon stroje v chodu do trojúhelníka je

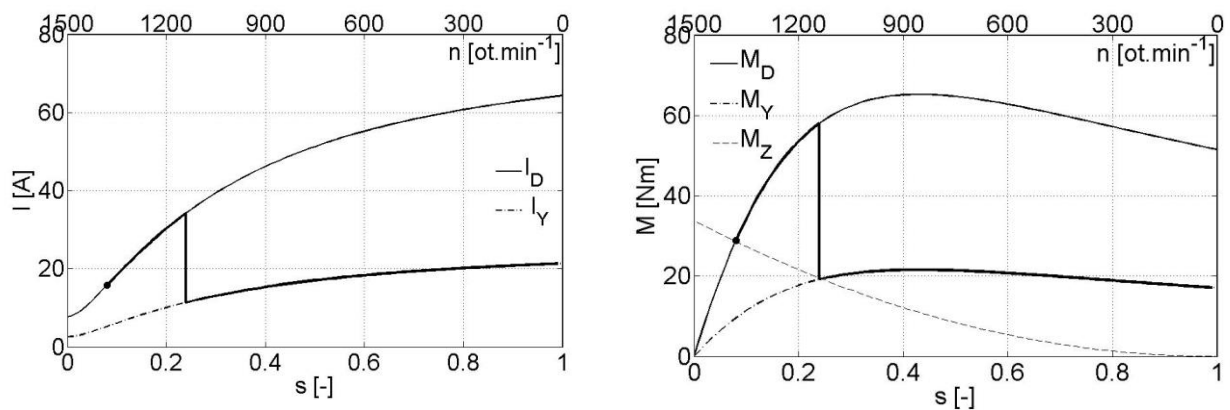
$$P_\Delta = 3U_s I_f \sqrt{3} = 3 P_Y \quad (13.9)$$

tj. výkon se zvětší $3\times$ vzhledem k zapojení do hvězdy.

² Nevztahuje se na pístová čerpadla!



Obr. 13-1 Napětí a proud v zapojení Y a D.



Obr. 13-2 Proud a moment v zapojení Y a D.

Stroj však musí být na sdružené zapojení dimenzován. Na štítku stroje proto musí být tyto údaje:

~~U=230_Δ / 400_Y V~~

Y- D spouštět NELZE !

U=400_Δ / 690_Y V



Y- D spouštět LZE !

Obr. 13-3 Štítkové údaje stroje pro rozběh sníženým napětím Y-D.

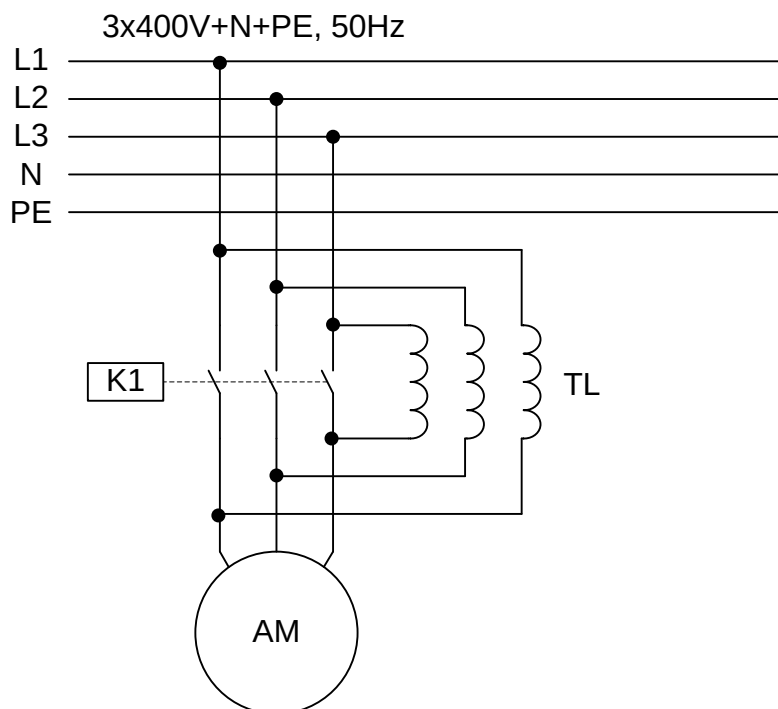
Zmenší-li se při provozu zatížení stroje natolik, že proud má v zapojení Y ještě přijatelnou velikost, využije se toho a stroj se nechá v chodu v zapojení do Y. Nastane tím zlepšení účinníku. Záběrný moment klesne na třetinu, záběrný proud rovněž na třetinu, takže činitel jakosti spouštění je

$$g_s = \frac{k_M}{k_I} = \frac{1/3}{1/3} = 1 \quad (-) \quad (13.10)$$

Nevýhodou je proudový i momentový ráz při přepínání, kdy jde vinutí rozpojeno. Jedná se vlastně o start roztočeného stroje v zapojení D.

13.5 Spouštěcí tlumivka TL

Tato zapojení kromě tlumivky nebo reaktoru vyžaduje ještě dva stykače nebo spínače. Nejprve sepne stykač K1 a po rozběhu stykačem K2 tlumivku vykrátíme a tím připojíme stroj přímo k síti. Magnetická energie tlumivky způsobuje velké proudy v kontaktech stykače K2, než dojde k zániku magnetického toku tlumivkou. Takto lze spouštět ventilátory a odlehčená čerpadla (zavzdušněná, bez kapaliny).



Obr. 13-4 Spouštění pomocí tlumivky.

Záběrný moment klesá s druhou mocninou poklesu záběrného proudu, takže činitel jakosti spouštění je

$$g_s = \frac{k_M}{k_I} = \frac{0,25}{0,5} = 0,5 \quad (-) \quad (13.11)$$

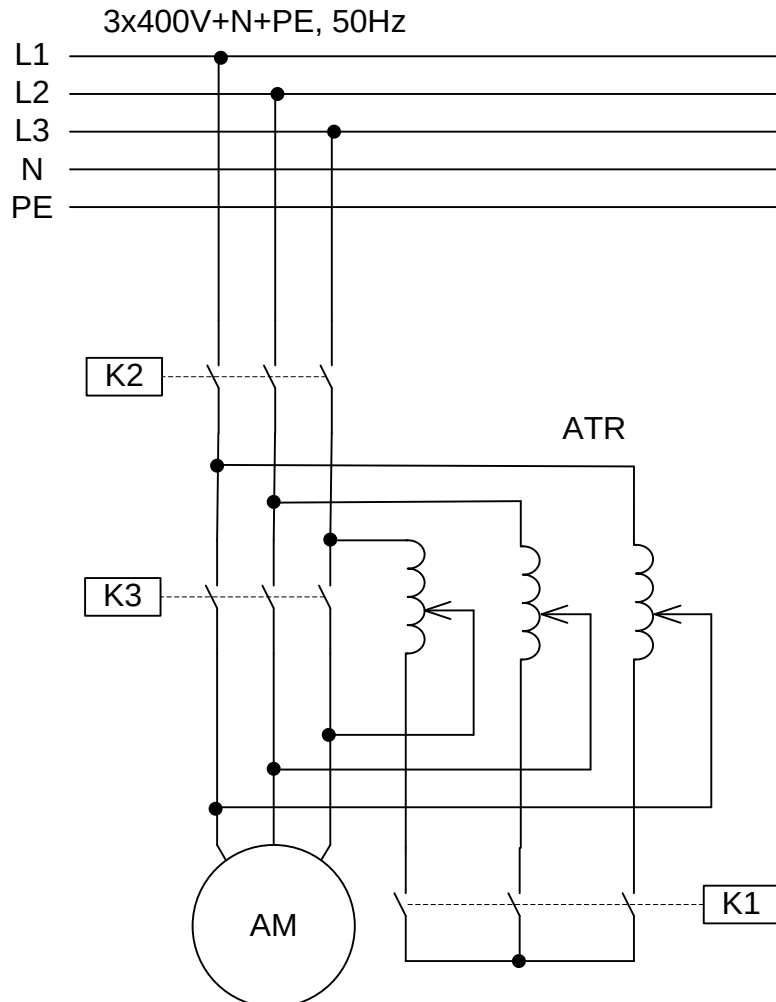
13.6 Spouštěcí autotransformátor ATR

Tento způsob vyžaduje tři stykače nebo spínače a autotransformátor. Sepnutím stykače K1 se vytvoří uzel ATR a stykačem K2 se následně stroj připojí na snížené napětí, tj. na odbočku ATR. Po dokončení rozběhu se pro snížení proudového rázu rozpojí uzel ATR stykačem K1. Tím je stroj připojen k síti přes reaktanci vstupní části vinutí ATR, která se následně vyřadí stykačem K3.

Tento způsob je vzhledem ke spouštění tlumivkou výhodnější. Proud ze sítě totiž klesá vlivem převodu ATR stejně jako moment motoru. Např. při převodu ATR $k=0,5$ klesne napětí a tedy i proud motoru na polovinu. Moment stroje klesne na $\frac{1}{4}$. Proud ze sítě však bude vlivem převodu ATR také $\frac{1}{4}$. Proto je činitel jakosti spouštění

$$g_s = \frac{k_M}{k_I} = \frac{0,25}{0,25} = 1 (-) \quad (13.12)$$

a dosáhne se stejného poklesu záběrného momentu i záběrného proudu. To je stejný výsledek jako u spouštění Y-D, ale cenově je nákladnější spouštění pomocí ATR.



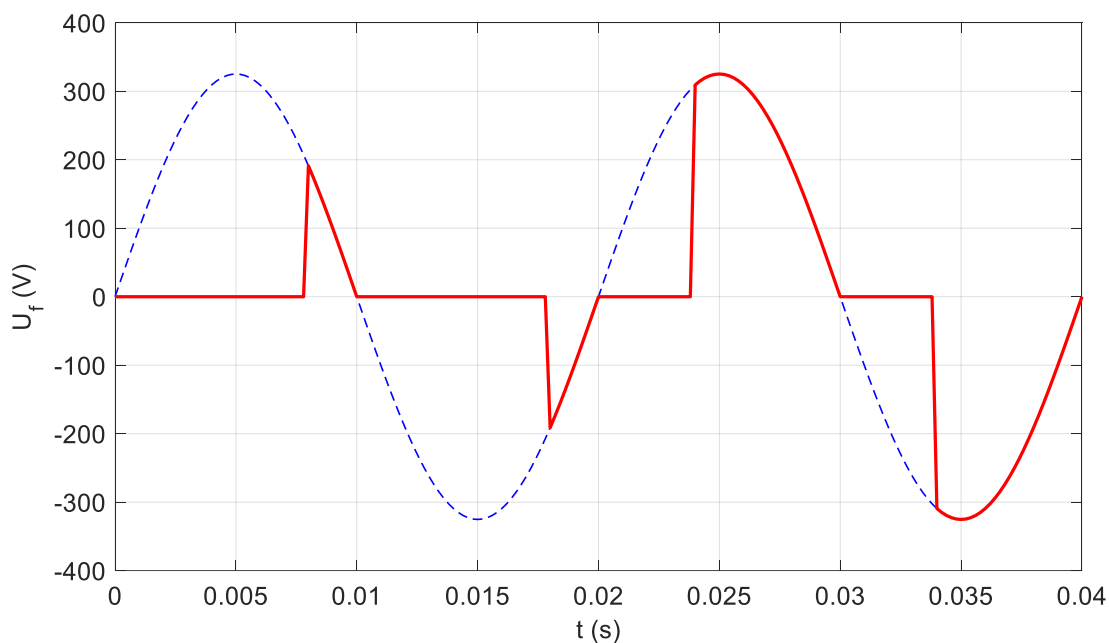
Obr. 13-5 Spouštění pomocí autotransformátoru ATR.

13.7 SOFT START

Napětí lze snižovat též pomocí výkonové elektroniky. Tato zařízení se nazývá přejatým názvem z angličtiny SOFT START.

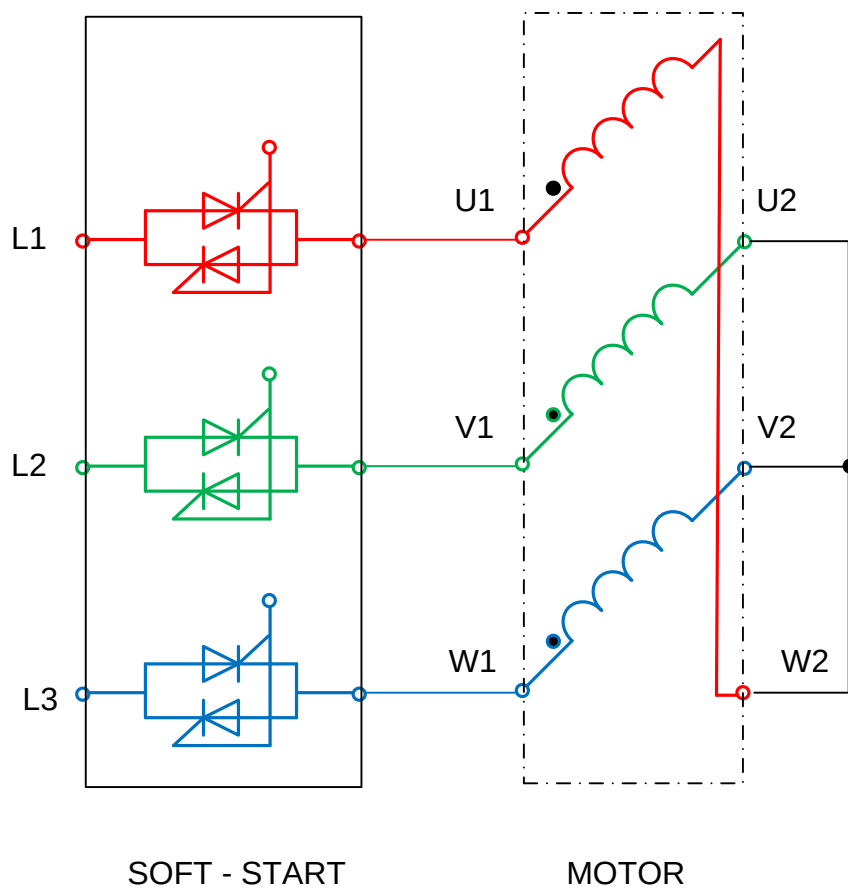
Principem zařízení je vhodné řízení času, kdy se na hradla tyristorů přivádějí zapínací impulzy. Tím lze plynule řídit velikost efektivní hodnoty napětí, které přivádíme na vinutí motoru.

V kladné půlperiodě vede jeden tyristor z paralelní dvojice, v záporné půlperiodě druhý tyristor. Na obrázku je v první periodě vyslán zapínací impulz na hradla tyristorů později a proto je úhel sepnutí menší. V druhé periodě byl zapínací impulz vyslán dříve a proto je úhel sepnutí delší. Efektivní hodnota napětí se ve druhé periodě zvýšila.



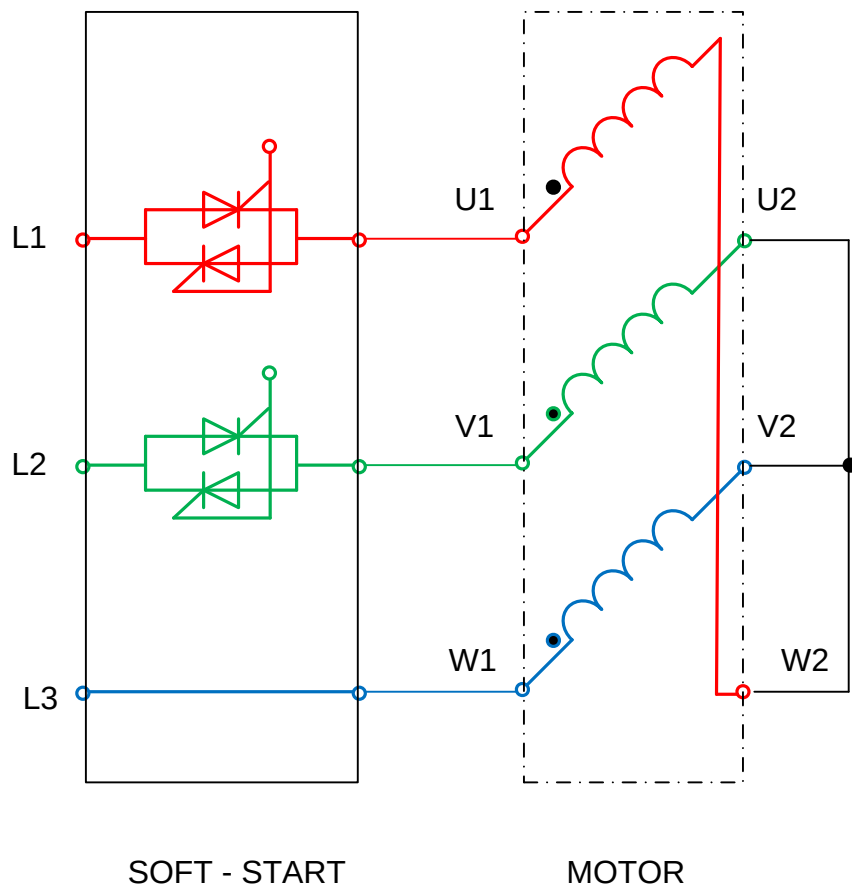
Obr. 13-6 Řízení napětí pomocí tyristorů.

V každé fázi jsou zapojeny antiparalelně dva tyristory. Podobnou funkci má také triak, ale kombinace dvou tyristorů je odolnější vzhledem k přepětím, která vznikají.



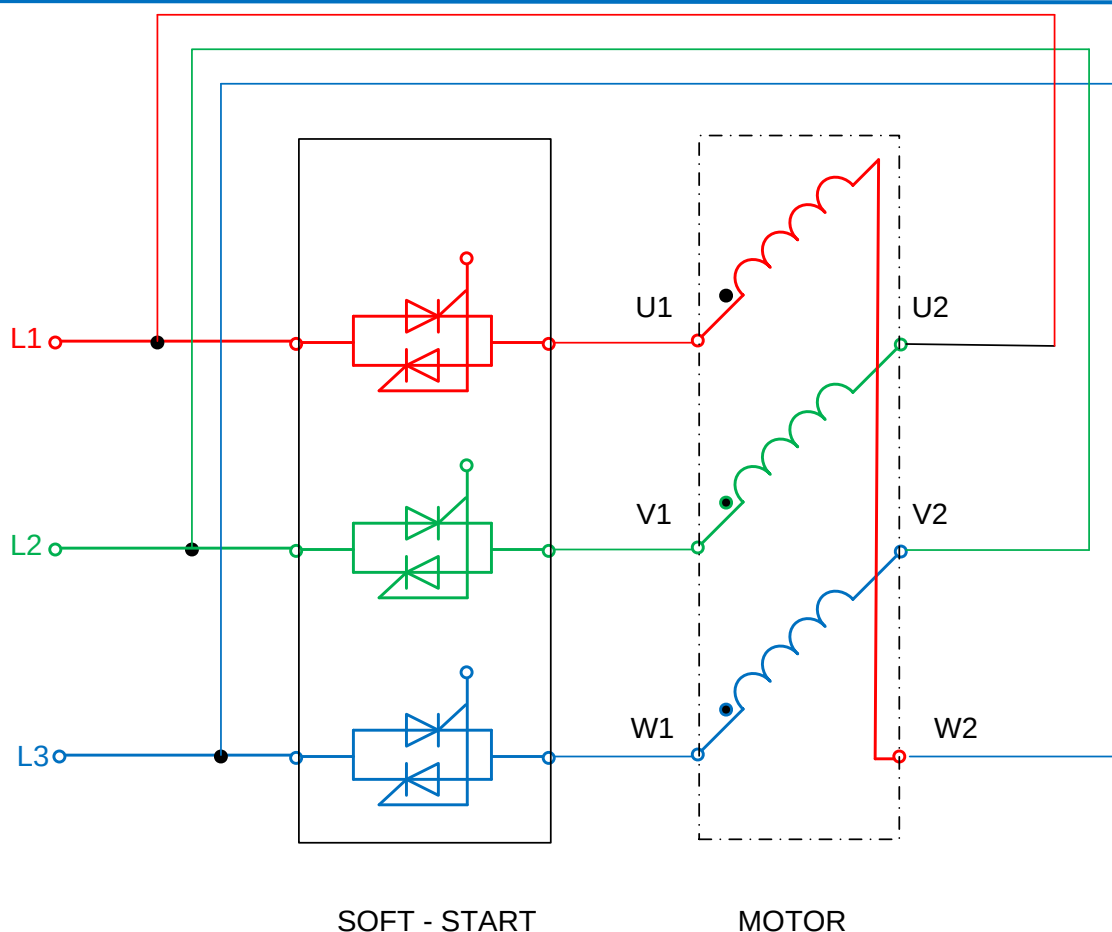
Obr. 13-7 Zapojení silového obvodu SOFT STARTu a motoru.

Pro malé motory s výkony asi do 11 kW lze SOFT START provozovat i v úspornějším zapojení. Jedna fáze není tyristory osazena. Principem úspory je skutečnost, že pokud je motor zapojen do hvězdy, tak při vypnutých tyristorech ve dvou fázích nemůže téci proud ani třetí fázi, protože se nemá kam uzavírat. Zapojení sice není symetrické a pro velké stroje se nepoužívá, nicméně pro malé motory je to úspora vítaná. Podmínkou je však zapojení motoru Y.



Obr. 13-8 Úsporné zapojení silového obvodu SOFT STARTu.

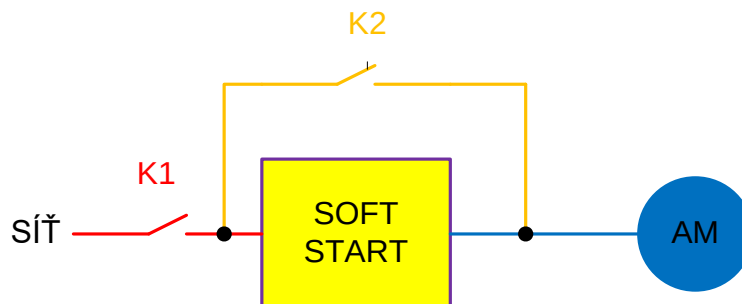
Další možností, jak dosáhnout jisté finanční úspory (zejména pro velké motory), je zapojení SOFT STARTu přímo do vinutí pro motory spojené do trojúhelníka. SOFT START tak můžeme proudově dimenzovat na proud 1,7x nižší, než kdyby byl zapojen v hlavním přívodu. Podmínkou je však použití SOFT STARTu v plné konfiguraci, tj. s tyristory ve všech fázích.



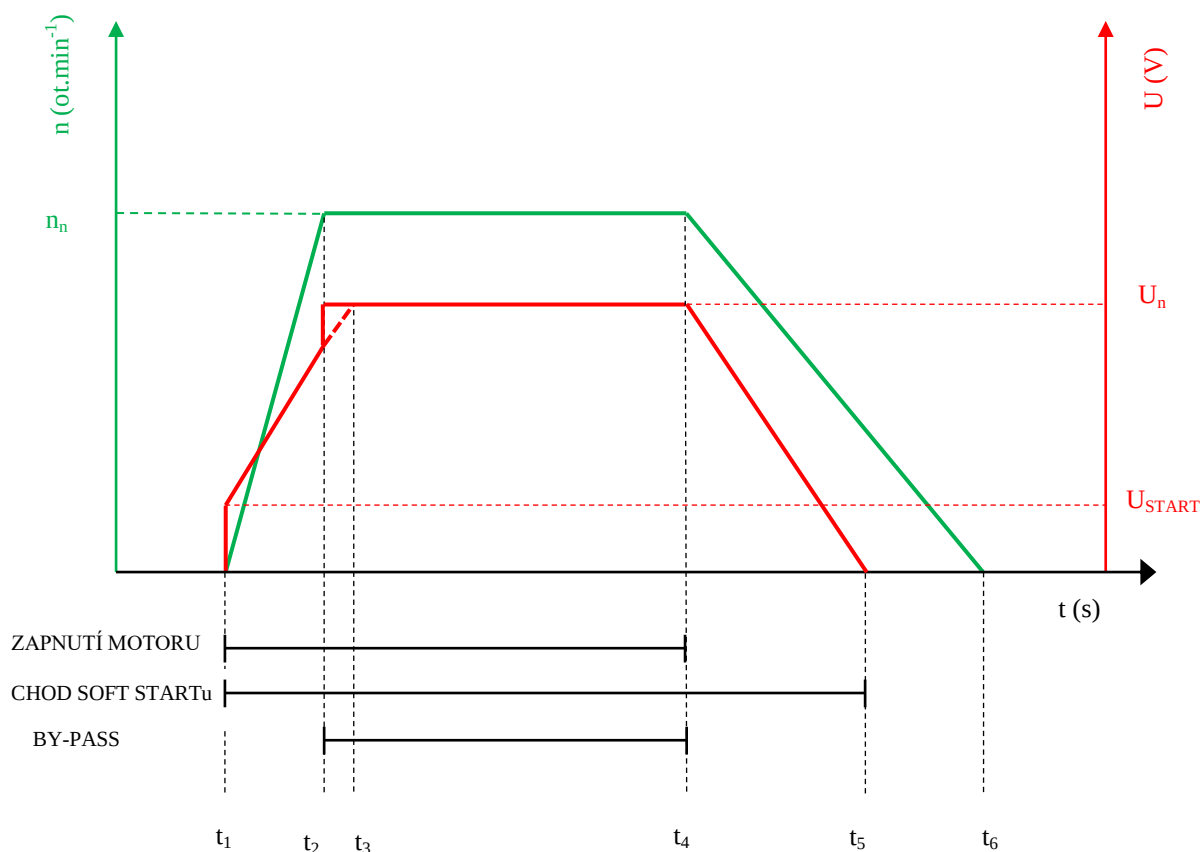
Obr. 13-9 Zapojení SOFT STARTu přímo do vinutí u motoru v zapojení D.

Vhodným řízením tyristorů proto můžeme plynule zvyšovat napětí na motoru a tím omezit záběrný proud.

SOFT START musí být vybaven (kromě nadproudové ochrany, řídicích obvodů apod.) dvěma stykači. Stykač K1 zajistí bezpečné galvanické odpojení motoru od sítě. Stroj totiž sice nemusí být v chodu, protože tyristory jsou uzavřeny, ale přesto se z bezpečnostního hlediska považuje za zařízení pod napětím a nesmí se na něm pracovat bez galvanického odpojení od sítě. Stykač K2 se spíná pro překlenutí výkonových prvků po dokončení rozběhu. Přestože jsou tyristory plně otevřeny, vzniká na jejich PN přechodech jistý úbytek napětí a tím i výkonová ztráta. Proto se SOFT START přemostí tzv. by-pass stykačem K2, aby se výkonové prvky při provozu zbytečně neohřívaly. Současně se prodlužuje jejich životnost.



Obr. 13-10 Galvanické odpojení a by-pass SOFT STARTu.

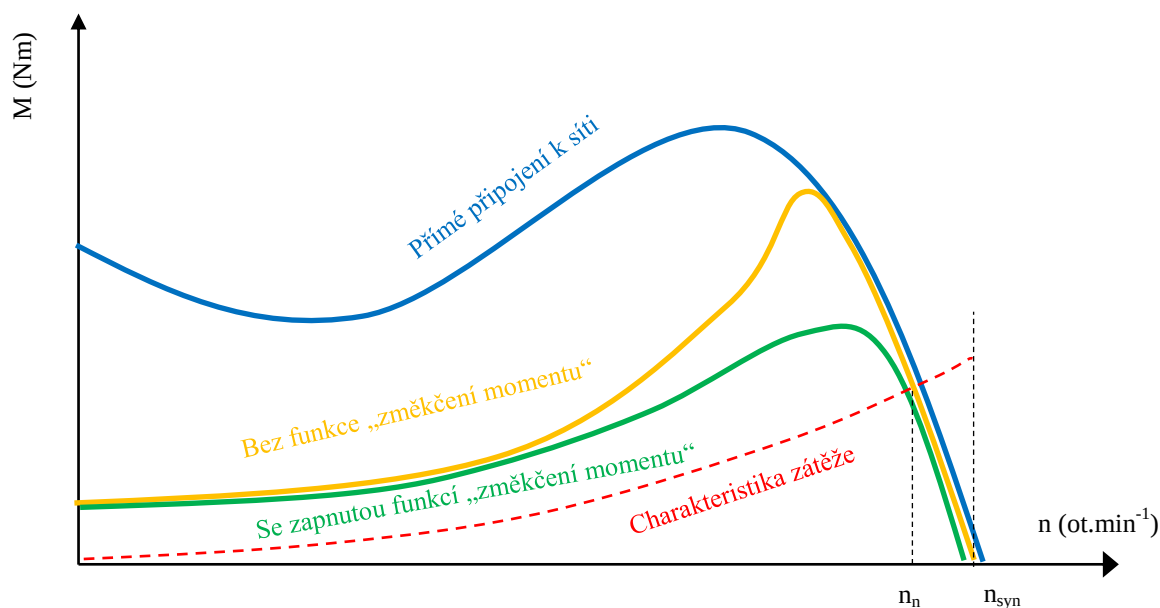


Obr. 13-11 Postupné zvyšování napětí v závislosti na čase.

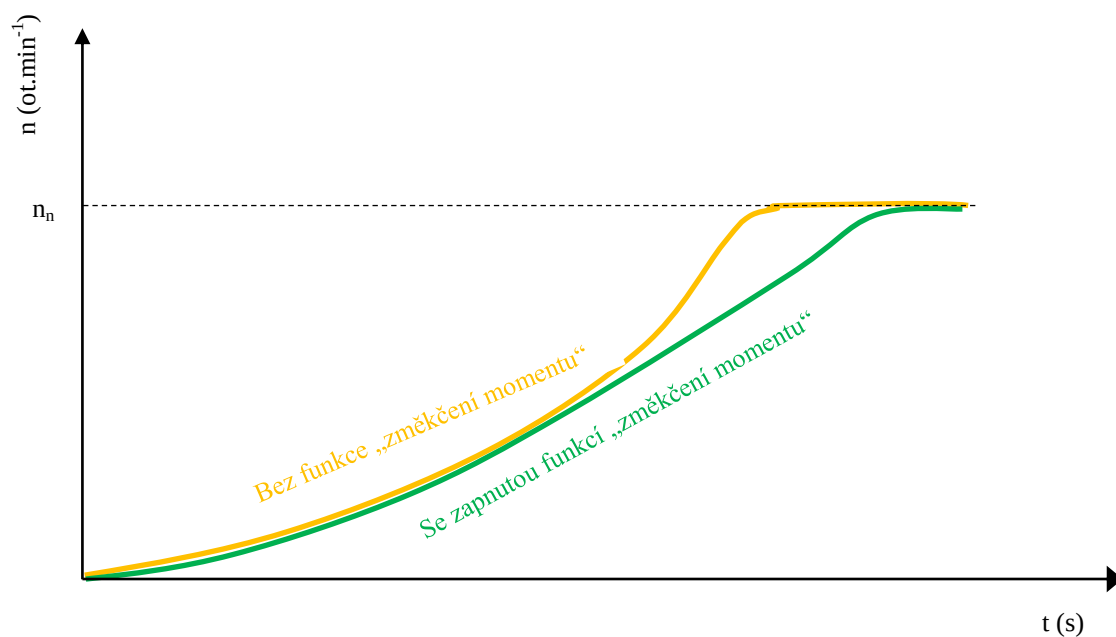
- t_1 start motoru s nastaveným startovacím napětím U_{START}
- t_2 dosažení jmenovité rychlosti
- t_3 koncový čas nastavené rozběhové rampy ($t_3 - t_1$)
- t_4 povel k vypnutí motoru
- t_5 konec nastaveného času zastavení
- t_6 zastavení motoru

Vhodným řízením spínání tyristorů lze velikostí napětí příznivě ovlivňovat moment motoru při rozběhu. Této funkci se říká „soft torque“, tj. změkčení momentové charakteristiky.

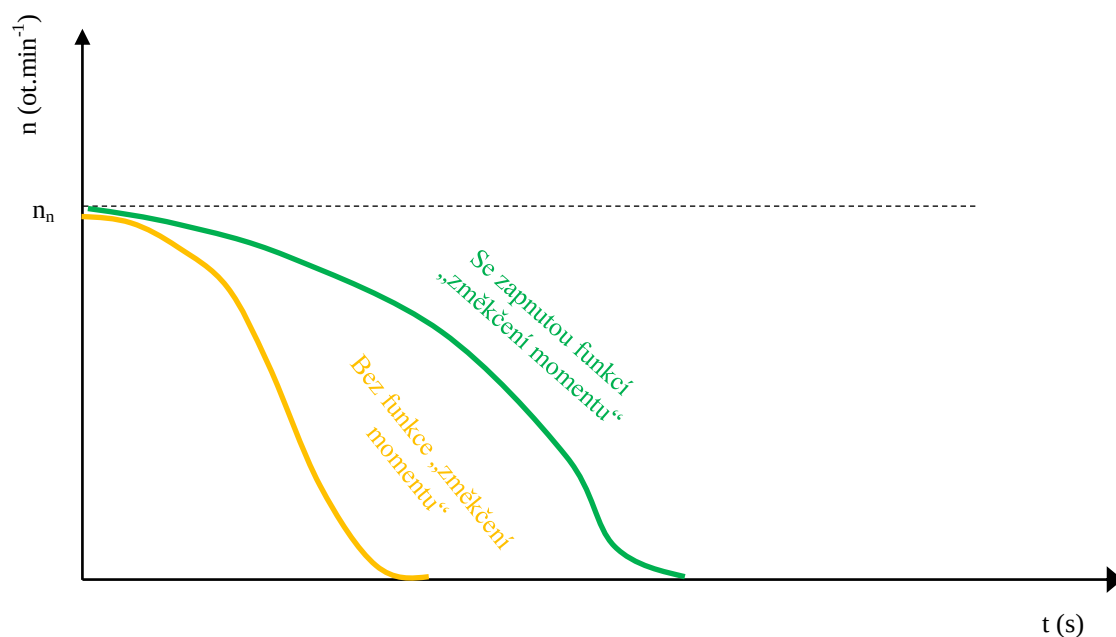
Při kvadratickém průběhu momentové charakteristice zátěže by v okolí momentu zvratu nastával velký přebytek momentu, a to by mohlo způsobovat nežádoucí prudký nárůst zrychlení rotoru (**žlutá charakteristika**). Zejména pro čerpadla je toto kritické, protože vznikají silné rázy v potrubí s čerpanou kapalinou. Proto před dokončením rozběhu tato funkce cíleně snižuje velikost efektivní hodnoty napětí. Tím dojde k poklesu velikosti momentu zvratu (**zelená charakteristika**). Přebytek elektromagnetického momentu nad momentem zátěže (**červená charakteristika**) v každém bodě je přibližně konstantní a tím se zajistí plynulý rozběh.



Obr. 13-12 Změkčení momentové charakteristiky před dokončením rozběhu.



Obr. 13-13 Vliv změkčení momentové charakteristiky před dokončením rozběhu na rychlost motoru.



Obr. 13-14 Vliv změkčení momentové charakteristiky na rychlost při doběhu motoru.

Pro čerpadla je použití SOFT STARTu vhodné i při vypínání. Je totiž výhodný doběh motoru s čerpadlem s téměř konstantním zpomalením. Tím se výrazně omezí nežádoucí silné rázy v potrubí.

Pro dochlazení elektroniky musí být zajištěno napájení SOFT STARTu i po vypnutí motoru. Počet spouštění je omezen (např. 1x za 5min), aby nenastalo přehřátí výkonových prvků.

13.8 Kmitočtový rozběh

Jedná se o nejmodernější způsob rozběhu, kdy nedochází k proudovým rázům a stroj lze plynule rozběhnout, často i na rychlosti větší než jmenovitě. Je však potřeba zdroj proměnného kmitočtu (kmitočtový měnič), jehož cena je porovnatelná s cenou samotného stroje. Proto se používá zpravidla jen pro napájení strojů, kde je potřeba řídit jejich rychlost (trakce), moment, popř. polohu rotoru. Zásady jsou shodné jako pro řízení rychlosti.

13.9 Rozběh změnou odporu v rotoru

Pokud při rozběhu vhodně měníme odpor v obvodu rotoru, tj. odpor $\frac{R'_2}{s}$, můžeme jednak výrazně omezit záběrný proud a současně zvýšit záběrný moment. Záběrný moment bude v optimálním případě podobně veliký jako maximální moment M_{max} .

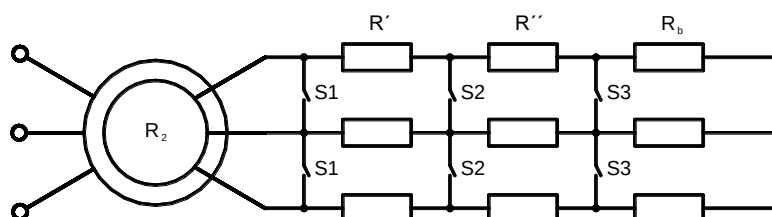
Tento způsob umožňují stroje

- Kroužkové, tj. s vinutou kotvou
- Se speciální kotvou nakrátko

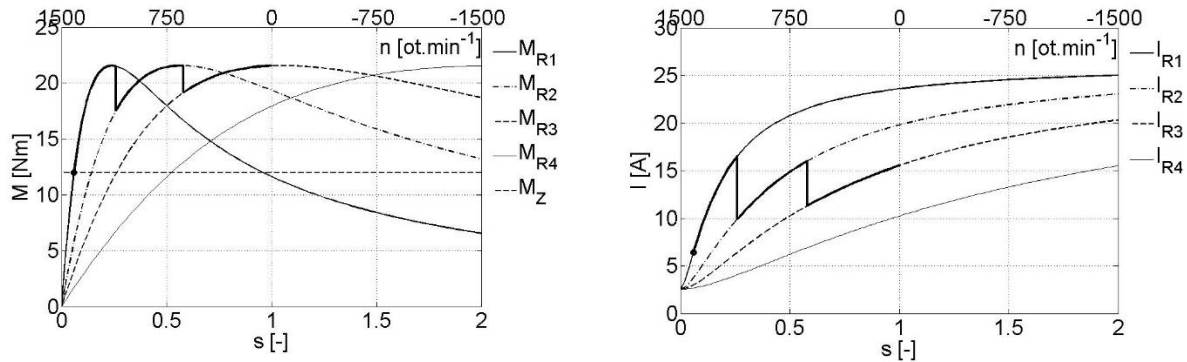
Rozběh stroje s vinutou kotvou

Zvětšení odporu kotvy se provede připojením externích rezistorů ke kartáčům, resp. k rotorovým svorkám. Toto opatření vede ke zvětšení skluzu momentu zvratu. Hodnota maximálního momentu se přitom nemění.

Pomocí vhodně navržených spouštěcích odporů lze dosáhnout stupňovitého rozběhu, přičemž proud i moment budou kolísat v určitých přijatelných mezích. Stroj lze spouštět např. maximálním momentem. Externí spouštěcí odpory je optimální spínat v závislosti na dosažené rychlosti stroje, ale cena otáčkového snímače je zpravidla vysoká. Proto se spínání řídí vhodně nastavenými časovými relé.



Obr. 13-15 Schéma zapojení spouštěcích odporů a zkratovacích stykačů.

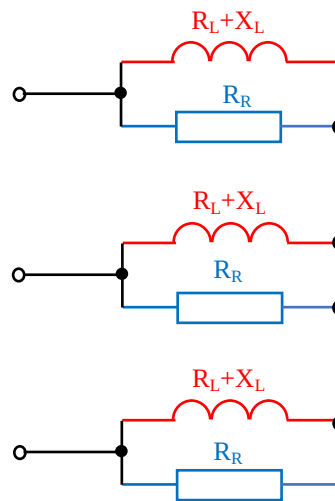


Obr. 13-16 Poměry na momentové a proudové charakteristice při vyřazování spouštěcích odporů. Znáznorněna je též brzdná charakteristika pro odpor $R=R_2+R'+R''+R_b$.

Zajímavou možností je připojení do obvodu rotoru externí paralelní kombinace R-L. Na počátku rozběhu je při zapnutí v obvodu rotoru kmitočet síťový, např. $f_1=50\text{Hz}$. Protože reaktance tlumivky je pro tento kmitočet vyšší než odpor rezistoru

$$X_L > R_R (\Omega) \quad (13-13)$$

teče dominantní část rotorového proudu tímto rezistorem a charakteristika stroje má velký záběrný moment.



Obr. 13-17 Paralelní R-L kombinace v obvodu rotoru.

Při rozběhu postupně klesá kmitočet v obvodu rotoru

$$f_2 = s f_1 (\text{Hz}) \quad (13-14)$$

a tím současně klesá i reaktance tlumivky

$$X_L = 2\pi f_2 = 2\pi s f_1 (\text{Hz}) \quad (13-15)$$

Proto proud rotoru stroje postupně přebírá tlumivka, která musí mít splněno

$$R_L < R_R (\Omega) \quad (13-16)$$

Tím se charakteristika stává tvrdší a přejde postupně na tvrdou pracovní charakteristiku. Tento typ spouštění se používá např. v povrchových dolech na pásových dopravnících. Zde se jedná o trojmotorový pohon.

Vlastnosti spouštění stroje s vinutým rotorem proto můžeme shrnout takto:

Výhody:

Výtečné momentové charakteristiky

Plynulý rozběh

Nevýhody:

Drahý stroj (až 12x v porovnání s kotvou nakrátko)

Větší zástavbové rozměry

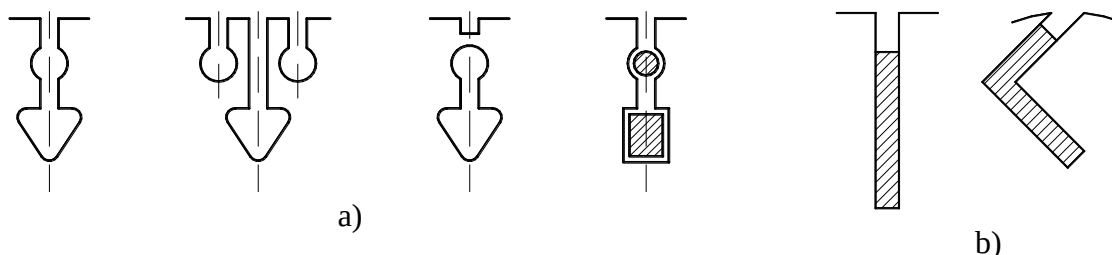
Složitější obsluha

Nákladnější údržba

Proto v minulosti byla věnována velká pozornost výzkumu kotev nakrátko. Snahou bylo dosáhnout podobně výhodných vlastností při zachování levné výroby kotvy nakrátko.

Rozběh stroje se speciální kotvou nakrátko

Pomocí speciálních tvarů tyčí klece nakrátko, lze snížit záběrný proud a naopak získat příznivější tvar momentové charakteristiky v oblasti velkých skluzů.



Obr. 13-15 Speciální klece nakrátko - Boucherotova (dvojitá) kotva (a), vírová kotva (b)

V okamžiku připnutí statoru ke zdroji je kmitočet proudů, indukovaných do vodičů rotoru roven napájecímu kmitočtu. Vlivem skinefektu a vyšší reaktance vodiče u dna drážky neprotéká proud celým průřezem vodiče, ale pouze jeho částí, která leží blíže vzduchové mezery, což vede ke zvýšení ohmického odporu. Tento jev je plně využit u Boucherotovy kotvy, která má 2 klece nakrátko

- Vnější, tzv. rozběhovou, která je lokalizována na velkém poloměru u vzduchové mezery. Dělá se z materiálu s větším odporem (např. z mosazi) a s menším průřezem tyčí
- Vnitřní, tzv. běhovou (pracovní) klecí. Je umístěna na menším poloměru, tj. hluboko v magnetickém obvodu rotoru. Její vodiče mají větší průřez. Po ukončení rozběhu je v rotoru kmitočet velmi nízký, reaktance pracovní klece klesne a proud prochází pracovní klecí. Její odpor poklesne, což se projeví „tvrdou“³ momentovou charakteristikou v pracovní oblasti.

³ Momentovou charakteristiku můžeme označit ve stabilní části za „tvrdou“, pokud se vzrůstajícím zatížením otáčky stroje klesají jen velmi málo

Dnes se asynchronní stroje pro průmyslové použití⁴ vyrábějí téměř výhradně s touto dvojitou klecí. Její materiál býval výhradně hliník, dnes se z důvodů vyšší účinnosti používá stále častěji měď.



Otázky k tématu:

- Odhadněte velikost záběrného proudu motoru se jmenovitým proudem 4,1 A.
- V jakém bodě momentové charakteristiky nastává připojení asynchronního stroje v klidu k síti?
- Z fyzikálního hlediska brždění protiproudem je limitováno skluzem $s=2$?



Správné odpovědi

- Odhadněte velikost záběrného proudu motoru při přímém připojení k síti se jmenovitým proudem 4,1 A.

Záběrný proud je 6-8 násobek jmenovitého proudu, takže to bude 24,6-32,8 A.

- Pokud má zátěž konstantní velikost momentu pro jakoukoliv rychlost, jak se mění s rychlostí výkon stroje?

Protože platí

$$P = M\omega \quad (13.17)$$

a moment je konstantní, bude velikost výkonu motoru úměrná jeho rychlosti.

- Změní se po přepnutí Y-D rychlost stroje?

Změní, ale nijak významně. Změna bude dána jen změnou skluzu v lineární části momentové charakteristiky. Změna rychlosti bude proto jen několik zlomků procenta.

- Proč se SOFT START realizuje raději pomocí tyristorů než pomocí triaku?

Důvodem je vyšší odolnost tyristorů proti přepětí.

- Proč se musí u stroje s vinutým rotorem po dokončení rozběhu vyřadit spouštěcí odpory?

Důvodem je změkčení momentové charakteristiky v pracovní oblasti. Zvyšuje se hodnota skluzu platná pro moment zvratu. Pro rozběh je změkčení žádoucí, ale pro trvalý chod nikoliv. Stroj by pak pracoval s velkým skluzem, spouštěcí odpory by byly trvale zatěžovány a nastalo by jejich tepelné zničení.

⁴ Neplatí např. pro trakční motory.