STŘÍDAČE

Základní funkcí je vytvoření střídavého napětí (proudu) ze zdroje stejnosměrného. Používají se například jako koncové stupně stejnosměrného přenosu elektrické energie, jako tzv. záskokové zdroje při napájení důležitých střídavých spotřebičů z náhradních zdrojů (baterií) při výpadku napětí. Největší využití je však v sestavě nepřímého měniče kmitočtu.

Některá kritéria pro rozdělení jsou obvyklá jako u usměrňovačů (počet fází, způsob zapojení). Dále lze střídače dělit:

a) dle charakteru napájecího zdroje:
- napěťový střídač
- proudový střídač

b) dle způsobu komutace
- s vnější komutací
- s vlastní komutací
- s měkkou komutací
- bez komutace

c) dle způsobu řízení výstupního napětí je napěťový střídač
- s neřízeným výstupním napětím
- s řízeným výstupním napětím

Střídače s vnější komutací – jsou to obvykle měniče komutované sítí[1]. V principu se jedná o usměrňovače ve střídačovém režimu, kdy je přenos energie ze stejnosměrné strany na střídavou. Zdrojem komutačního napětí je sama střídavá síť. Měniče nejsou vybaveny komutačními obvody.

[1] Na střídavé straně nemusí být pouze veřejná síť střídavého napětí. Mohou to být synchronní motory nebo asynchronní motory doplněné kondenzátory. Speciální oblastí střídačů jsou též stejnosměrné přenosy elektrické energie.

ESF II projekt Západo eské univerzity v Plzni, reg. . CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Střídače s vlastní komutací – jsou měniče, u kterých je komutace zajištěna ve střídači. Obdobně jako u pulzních měničů je nutné buď vybavit tyristory doplňkovými komutačními obvody (které zabezpečí vypnutí tyristoru v libovolném okamžiku), nebo použít vypínatelné součástky (GTO, IGBT). Hlavní využití je jako součást nepřímých měničů kmitočtu. Kromě toho se mohou používat pro napájení autonomních elektrických sítí pro libovolné zátěže nebo jako záskokové zdroje pro udržení chodu spotřebičů při výpadku veřejné sítě.
Střídače s měkkou komutací – principem je komutace součástek ve chvíli, kdy je na součástce nulové napětí nebo součástka vede nulový proud. Příkladem jsou rezonanční střídače. Tyto střídače mají menší ztráty a mohou pracovat s vyššími spínacími kmitočty. Jsou však složitější.

Napěťový střídač – je napájen zdrojem s malou vnitřní impedancí. Napětí může být konstantní nebo regulované. Charakteristickou součástí stejnosměrného napájecího zdroje bývá velký kondenzátor jako zdroj špičkové energie. Energetickým zdrojem bývá nejčastěji usměrňovač napájený ze střídavé sítě. Napěťové střídače dnes představují většinu střídačů v elektrických regulovaných střídavých pohonech. Nejčastěji se dnes osazují vypínatelnými součástkami, zejména IGBT.
Proudový střídač – je napájen ze zdroje konstantního proudu. Proto je charakteristickou součástí velká tlumivka ve stejnosměrném obvodu, která zabezpečuje vyhlazení proudu. Součástky proudových střídačů musí vydržet napětí způsobená přerušováním proudu v indukčnosti zátěže. Proudové střídače se dnes používají zřídka, a to zejména pro pohony velkých výkonů, jako například kompresory, rozběhy soustrojí v přečerpávacích elektrárnách, pro indukční ohřevy atd.

1. Základní principy napěťových střídačů

Střídač[2] si lze zjednodušeně představit jako soubor spínačů, které střídavě připojují k zátěži kladný nebo záporný pól stejnosměrného zdroje. Frekvence spínání pak určuje výstupní frekvenci střídače. Pro jednoduchost uvažujme nyní zátěž typu R, neboť jinak je třeba obvod přizpůsobit zapojením tzv. nulových diod.

U jednofázového polomůstkového spojení je k činnosti dvou zdrojů napětí – výhodou jsou pouze 2 spínače. U uzlového spojení stačí jeden zdroj, je ale třeba transformátoru s vyvedeným středem. Nejběžnější je jednofázové můstkové spojení, zejména pro výkonové aplikace. Trojfázová spojení lze řešit jako uzlová či můstková, používá se obvykle zapojení můstkové.

1. *Jednofázový napěťový střídač*

Stejnosměrný zdroj střídače má charakter zdroje napětí, nezávislého na velikosti odebíraného proudu. Spínáním spínačů je u napěťových střídačů vytvářen průběh výstupního napětí. Průběh proudu je následně dán charakterem zátěže. Základní schémata jednofázových napěťových střídačů jsou na obrázcích.

a) Ohmická zátěž

Současným sepnutím spínačů Sp_1, Sp_2 začne protékat odporem kladný proud i_z. Vypnutím spínačů a současným sepnutím spínačů Sp_3, Sp_4 změní proud svoji polaritu. Podle kmitočtu spínání tyristorů můžeme řídit kmitočet napájecího napětí a proudu zátěže. Jestliže nebudeme uvažovat nutnou ochrannou dobu spínačů, bude odporem protékat proud obdélníkového průběhu o délce obdélníku π.

b) Zatížení do odporu a indukčnosti

V případě, že je zátěž tvořena kombinací odporu a indukčnosti, není možné vypnout a změnit polaritu proudu bez toho, aby vzniklo na indukčnosti L přepětí.

[2] V zahraničí se též nazývá jako invertor.

Sledujme polaritu napětí připojeného na spotřebič v závislosti na proudu a stavu sepnutí spínačů. Předpokládejme směr proudu kladný od svorky 1 ke svorce 2.
Při sepnutí Sp_1, Sp_2 je na zátěži $u_Z = U_d$; proud i_z exponenciálně narůstá k hodnotě U_d/R. Část energie se akumuluje v indukčnosti L. Takt končí vypnutím spínačů. Pak proud i_z nemůže zaniknout, a proto je nutné, aby byl střídač vybaven nulovými diodami, které v dalším intervalu převezmou vedení proudu (po vypnutí Sp_1, Sp_2 přebírají proud i_z diody V_{03} a V_{04}). Tím je na zátěži napětí $u_z = - U_d$ a energie se z indukčnosti L vrací (kromě ztrát v odporu R) do zdroje U_d. Tento interval končí poklesem proudu i_Z na nulu. Jakmile nulové diody vypnou, může sepnout Sp_3, Sp_4, na zátěži je $u_z = -U_d$ a proud klesá na hodnotu – Ud/R. Energie je opět přijímána zátěží. Dále se situace opakuje. Zpětné (nulové) diody tedy vytvářejí jakýsi neřízený usměrňovač, umožňující výměnu jalové energie mezi zdrojem a zátěží a současně přenos činného výkonu ze zátěže do zdroje. Protože prakticky neexistuje pouze ohmická zátěž, musí být každý napěťový střídač vybaven nulovými diodami.

2. Třífázový napěťový střídač

Svým zapojením je podobný třífázovému můstkovému usměrňovači. Rozdíl je v tom, že ke každé vypínatelné součástce je antiparalelně připojena dioda. Dnes se obvykle realizují třífázové střídače s IGBT součástkami. Napěťový zdroj je většinou doplněn filtračním kondenzátorem, který je schopen dodávat do spotřebiče energetické pulzy bez významného poklesu napětí. Základní schéma střídače, pracujícího do odporové zátěže a průběhy napětí na jednotlivých fázích jsou na obrázku. Princip činnosti pro zátěž R a RL je obdobný jako u jednofázových střídačů.

a) Třífázový napěťový střídač pracující do motorické zátěže

Pro zjednodušení bude uvažován asynchronní motor pouze jako indukčnost L a harmonické napětí s kmitočtem rovným výstupnímu kmitočtu střídače.[3]

Schéma obvodu je na obrázku. Při zátěži typu motor (RLU_i) může střídač pracovat jak ve střídačovém režimu (energie je převáděna ze zdroje napětí do motoru), tak v usměrňovačovém režimu (energie je převáděna z motoru do zdroje napětí).

Průběh fázového napětí u_{z1} je stejný jako při zátěži R a nezávisí na spínání zpětných diod. Fázor 1. harmonické napětí U_{Z1} se při střídačovém chodu měniče předbíhá před fázorem 1. harmonické proudu o úhel $0 \le \varphi_1 \le \pi/2$. Naopak při generátorickém (usměrňovačovém) chodu střídače je fázový posuv $\pi/2 \le \varphi_1 \le \pi$. To odpovídá nezbytnému odběru jalového výkonu motorem jak v motorickém, tak i v generátorickém chodu. Při respektování úbytku napětí na reaktanci ωL pak vychází fázor vnitřního indukovaného napětí U při motorickém chodu zpožděn za fázorem U_{Z1} a naopak při generátorické chodu v předstihu před U_{Z1}. Tento výsledek je respektován v průbězích u_{Z1} a u_1 fáze 1 naznačených pro motorický i generátorický chod pod spínacími diagramy.

Na rozdíl od usměrňovačů, kde je střídačový režim usměrňovače nastaven úhlem řízení (a energie jde ze stejnosměrné strany na střídavou), je usměrňovačový režim střídače umožněn prací motoru v nadsynchronních otáčkách – rychlost motoru je větší než ω_s. Toho se dosáhne například snížením frekvence střídače.

[3] Uvedený obvod lze použít jako hrubé přiblížení k přesnějšímu modelu motoru v ustáleném stavu. Indukčnost L představuje rozptyl stroje, zdroj harmonického napětí je obrazem vnitřního indukovaného napětí.

Průběhy u_{Z1} a u_1 vymezují plochy, které jsou obrazem napěťového množství periodicky přiváděného (+) a odváděného (-) z indukčnosti zátěže. Na základě těchto napěťových množství pak můžeme odvodit křivku fázového proudu charakteristickou pro motor napájený z napěťového střídače s obdélníkovým řízením.

3. Řízení výstupního napětí střídače

Řízení výstupního napětí střídače je společně s řízením frekvence ve většině aplikací nezbytností. Týká se to zejména všech aplikací, u nichž je střídač použit pro řízení rychlosti střídavého stroje.

Způsoby řízení

a) amplitudové řízení,

b) šířkové řízení,

c) šířkově pulzní řízení,

d) šířkově pulzně modulované.

Amplitudové řízení – amplituda výstupního napětí střídače je přímo úměrná vstupnímu stejnosměrnému napětí. Je-li napájecím zdrojem stejnosměrného napětí například řízený usměrňovač, můžeme ho použít k řízení amplitudy výstupního napětí. V řadě aplikací je zdroj stejnosměrného napětí konstantní a tento způsob řízení nelze tím pádem použít.

Šířkové řízení – mění se šířka napěťových pulzů, po které jsou sepnuty jednotlivé spínače. Tím se mění efektivní hodnota výstupního napětí. Používá se zejména u jednofázových střídačů u spotřebičů, kde není na závadu vysoký obsah vyšších harmonických. Jedná se zejména o ohmické zátěže (indukční ohřevy). Pro třífázové aplikace se obvykle nepoužívá.[4]

[4] Je třeba poznamenat, že při šířkově pulzním nebo při šířkově pulzně modulovaném způsobu řízení se zpravidla nejvyššího výstupního napětí dociluje prostým přechodem na obdélníkové řízení s maximální možnou šířkou obdélníkové půlvlny.

Šířkově pulzní řízení – princip spočívá v tom, že se tranzistory v jednotlivých větvích střídače během půlperiody výstupního napětí několikrát zapnou a vypnou.
Šířkově pulzně modulované – princip vychází ze šířkově pulzního řízení. Šířka pulzů je v tomto případě proměnná – modulovaná. Konkrétné způsoby modulace se liší podle požadavku na tvar výstupního napětí. Vhodnou šířkou pulzů se často požaduje dosažení přibližně sinusového průběhu proudu.
Průběh výstupního napětí střídače může být podle způsobu spínání takového charakteru, že napětí se mění mezi třemi hladinami nebo mezi dvěma hladinami.

Realizace pulzně šířkové modulace

Nejstarší způsob vytváření šířkově pulzní modulace byl analogový způsob. S nástupem mikroprocesorové techniky se přechází na digitální principy, z nichž se často využívá princip založený na digitálním napodobení analogového řízení. Mezi další metody lze jmenovat metodu založenou na vylučování vyšších harmonických a metodu vycházejícího z vektorového zobrazení veličin.
Základní princip pulzně šířkové modulace (v literatuře též označovaný PŠM či z anglického **PWM**) je patrný z obrázku 2. Řídící sinusový signál (U_{ra}) má frekvenci odpovídající požadované výstupní frekvenci střídače.
Nosný signál (U_{pila}) je pilovitého charakteru. V elektronických obvodech (komparátoru) je hodnota obou napětí porovnávána a následně jsou spínány či vypínány jednotlivé spínače. To je prováděno ve všech fázích s tím, že pro sinusový signál je respektován příslušný fázová posuv 120^0. Výsledkem je napětí, které lze znázornit buď vzhledem k nulovému potenciálu systému (označeno **0**) nebo jako napětí na jednotlivých fázích (označeno $\mathbf{U_{Sa}}$**…**). Na obrázku 3 je nakreslena část výkonového obvodu střídače s vyznačením významů jednotlivých napětí. Současně jsou uvedeny jednotlivé průběhy sledovaných napětí.

4. Proudové střídače

Střídače proudu vytvářejí průběh výstupního proudu, avšak průběh napětí záleží na charakteru zátěže[5]. Stejnosměrný zdroj proudových střídačů má charakter zdroje proudu. Často je používán řízený usměrňovač. Na vstupu střídače je zapojena tlumivka s velkou indukčností L. Tlumivka je schopna v intervalech srovnatelných s několika takty udržet v obvodu konstantní proud. Současně tato tlumivka slouží jako filtr vyšších harmonických proudu.

Základní schémata proudových střídačů jsou v principu stejná jako u napěťových, odpadá zde nutnost instalace nulových diod. Základní můstkové zapojení jednofázového střídače proudu je na obrázku. Další "zvláštností" jsou komutační obvody. Komutační obvody plní nejen funkci vypínání hlavních tyristorů, ale současně "akumulátoru" jalové energie, uvolněné při komutaci zátěže (u napěťových střídačů je proud při vypnutí hlavního tyristoru veden nulovými diodami k napájecímu zdroji). Nové spínací součástky (IGBT) nepřinášejí proudovým střídačům žádné zvýhodnění ani žádné zlepšení jejich užitných vlastností.

5. Napájecí zdroje střídačů, činný a jalový výkon

Základní napěťové a proudové poměry střídačů jsou znázorněny na obrázku. Z tohoto obrázku je zřejmé:

a) *Napěťový střídač* – udržuje ve stejnosměrném obvodu napětí jedné polarity a při změně smyslu procházejícího výkonu se musí měnit smysl proudu. Je proto zapotřebí, aby tuto změnu umožnoval zdroj. Potřebujeme tedy reverzační usměrňovač.

b) *Proudový střídač* – udržuje ve stejnosměrném obvodu stálý smysl proudu. Při obrácení smyslu toku výkonu se musí měnit smysl napětí stejnosměrného obvodu. K tomu stačí na síťové straně normální, plně řízený usměrňovač, který umožňuje požadovanou reverzaci napětí.

[5] Tedy obráceně než u střídačů napěťových. Proudové střídače se dnes používají výjimečně.

6. Porovnání vlastností napěťového a proudového střídače

U střídačů je velmi důležitým faktorem kompatibilita střídače a zátěže. Napěťový a proudový střídač jsou v tomto smyslu téměř duální. Kvantitativně lze tedy kompatibilitu mezi střídačem a zátěží posuzovat obsahem harmonických složek v proudu a ve výstupním napětí střídače. Patří sem též problémy akustického hluku a nároky na řídící techniku.

a) **Porovnání dle křivky výstupního napětí a proudu** – u napěťových střídačů je výstupem křivka napětí, křivka proudu závisí na impedanci zátěže. U proudových střídačů naopak. Neharmonická křivka proudu pak působí těžkosti, např. při napájení střídavých strojů způsobuje pulzační momenty. To lze odstranit částečně zavedením pulzní modulace v řízení.

b) **Porovnání dle stejnosměrného napájecího zdroje** – u napěťového střídače je konstantní polarita napětí, u proudového střídače je konstantní směr proudu. Je-li tedy žádán obousměrný přenos výkonu a je-li jako zdroj stejnosměrného napětí usměrňovač, je výhodnější proudový střídač.

c) **Porovnání dle komutačních obvodů** – na komutační obvody proudových střídačů jsou kladeny velké nároky. U napěťových střídačů se velmi používají výkonovými tranzistory (IGBT), takže komutační obvody nejsou zapotřebí.

d) **Porovnání dle obsahu harmonických složek proudu a napětí** – u napěťových střídačů má výstupní napětí charakter velkého množství pulzů a tím obsahuje velké množství harmonických. Zkreslení je ovlivněno modulačním kmitočtem střídače. U proudových střídačů má naopak velké zkreslení výstupní proud.