



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ**
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

2015

Pracoviště: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky,
Regionální inovační centrum elektrotechniky,
Fakulta elektrotechnická

Výzkumná zpráva č.: 22190 - 004 - 2015

Aktivní prostředky pro kompenzaci a řízení toků výkonu v síti

Druh úkolu: vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. Štěpán Bláha, Ing. Tomáš Komrska, Ph.D.

Vedoucí úkolu: Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.

Počet stran: 51

Datum: Květen 2015

Tato práce vznikla s podporou projektu TA04020235 a projektu SGS-2015-038.

Anotace

Tato práce se zabývá ve své první části problematikou aktivních filtrů. Nejprve je proveden rozbor jednotlivých základních konfigurací aktivních filtrů, mezi které patří především sériová a paralelní konfigurace. Následně jsou představeny možné způsoby řízení aktivních filtrů počínaje vektorovým řízením přes použití Fourierovy transformace až po prediktivní řízení. Druhá část práce se zabývá problematikou moderního způsobu řízení toku výkonu v síti pomocí výkonových polovodičových měničů. Tato kapitola je zaměřena především na rozbor vybraných polovodičových zařízení určených k řízení toku výkonu, která spadají do široké skupiny zařízení označovaných zkratkou FACTS. Mezi vybraná zařízení FACTS je kromě základních typů jako STATCOM a SSSC zahrnut také UPFC a další typy odvozené z jeho konfigurace.

Seznam symbolů a zkratek

APF	Active Power Filter
FACTS	Flexible AC Transmission Systems

FFT	Fast Fourier Transform
MPC	Model Predictive Control
FCS-MPC	Finite Control Set - MPC

PST	Phase-shifting Transformer
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
VSC	Voltage Source Converter
CSC	Current Source Converter
UPFC	Unified Power Flow Controller
DPFC	Distributed Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller

Obsah

1 Úvod	4
2 Aktivní filtry	5
2.1 Druhy aktivních filtrů	5
2.1.1 Paralelní filtr	5
2.1.2 Sériový filtr	7
2.1.3 Kombinovaný filtr	8
2.1.4 Hybridní filtr	11
2.2 Řídící algoritmy	13
2.2.1 P-Q teorie	13
2.2.2 Metoda Fryze-Buchholz-Depenbrock	14
2.2.3 Vektorové řízení	16
2.2.4 Řízení s použitím Fourierovy transformace	18
2.2.5 Prediktivní řízení	21
3 Řízení toku výkonu v síti	27
3.1 Kompenzace na přenosovém vedení	27
3.1.1 Sériová kompenzace	28
3.1.2 Paralelní kompenzace	30
3.2 Zařízení FACTS	31
3.2.1 PST	31
3.2.2 STATCOM	32
3.2.3 SSSC	33
3.2.4 UPFC	34
3.2.5 DPFC	36
3.2.6 IPFC	40
4 Závěr	45

1 Úvod

Cílem této práce je poskytnout nejprve ucelený pohled na problematiku aktivních filtrů a způsobů jejich řízení. Další část této rešerše tvoří kapitola týkající se problematiky řízení toku výkonu v síti. V této kapitole je rozveden jednak základní princip řízení toku výkonu ale také jsou zde zmíněna vybraná zařízení, která mohou být k tomuto účelu použita.

Aktivní filtry nebo také APF jsou speciálně řízené měniče napětí resp. proudu. Jejich úkolem je spolehlivá kompenzace vyšších harmonických a jalového výkonu v rozvodné síti. Vyšší harmonické složky se v rozvodné soustavě vyskytují z důvodu velmi rozšířeného použití nelineárních zátěží jako například řízených/neřízených měničů - usměrňovačů. Tyto zařízení jsou pak zdrojem nežádoucích harmonických složek, které je potřeba kompenzovat.

S problematikou vyšších harmonických je svázán i pojem deformační výkon, který obdobně jako výkon jalový představuje neužitečnou složku zdánlivého výkonu. Deformační výkon způsobuje nárůst ztrát v napájecí síti a snižuje tak využitelnost sítě a měniče [1].

Problematika vyšších harmonických a s ní spojený deformační výkon jsou veličiny, které zásadním způsobem ovlivňují parametry a využití rozvodné soustavy. Aktivní filtry jsou pak nasazeny v provozu jako prvek, jehož úkolem je kompenzovat výskyt vyšších harmonických v rozvodné soustavě. Kompenzace vyšších harmonických je dosaženo generováním specifického průběhu (napětí/proudu) na výstupu aktivního filtru. Po zavedení tohoto průběhu do soustavy dojde k odstranění vyšších harmonických. Kompenzace jalového výkonu je dosaženo obdobným způsobem. V tomto případě je fázový posun mezi generovaným průběhem napětí a proudu odvozen od charakteru zátěže a tím snižuje celkový fázový posun napětí a proudu na straně zdroje.

Problematika řízení toku výkonu v síti se týká přenosových a distribučních soustav a je velmi aktuální zejména v souvislosti s jejich propojováním na úrovni regionů i jednotlivých států a v souvislosti s přibývajícím počtem připojených obnovitelných zdrojů, jejichž okamžitý výkon často velmi kolísá. Nedílnou součástí těch přenosových soustav jsou rozvodny (uzlové body) a flexibilní systémy řídící přenos výkonu v soustavě (FACTS)[2]. Právě tyto systémy jsou podrobeny rozboru v části této práce.

2 Aktivní filtry

Aktivní filtry mají oproti tradičním pasivním filtrům celou řadu výhod. Hlavní výhodou je schopnost generovat libovolný průběh napětí nebo proudu, tudíž svými možnostmi aktivní filtry předčí tradiční kompenzační prvky. Další výhodou aktivních filtrů mohou být menší rozměry. Zde ovšem záleží na celé řadě faktorů (kompenzace harmonických nebo jalového výkonu, případně obojího). Avšak i přes rychlý vývoj v oblasti polovodičových spínacích prvků a signálových procesorů je stále mírnou nevýhodou aktivních filtrů vyšší cena a nedůvěra konzervativního energetického odvětví ve spolehlivost těchto zařízení.

Univerzálnost moderních aktivních filtrů spočívá v množství funkcí, pro které mohou být použity. Jako příklad funkce lze uvést již zmíněnou kompenzaci vyšších harmonických, ale také mj. regulaci jalového výkonu, potlačení rezonance, vyvažování zátěže, snižování výkyvů napětí [3].

2.1 Druhy aktivních filtrů

Aktivní filtry se dají rozdělit podle několika kritérií. Jedním z možných rozdělení je podle způsobu připojení aktivního filtru k zátěži, kde první 2 typy (paralelní, sériový) jsou nejdůležitější a zbylé 2 typy jsou pouze kombinací předchozích typů.

1. paralelní filtr (derivační)
2. sériový filtr (kondicionér)
3. kombinovaný filtr
4. hybridní filtr

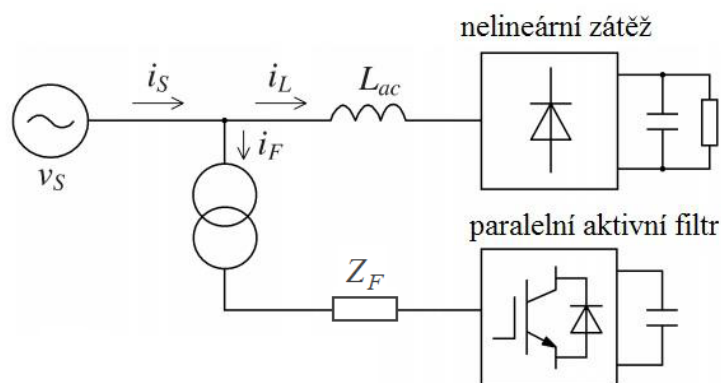
Následující sekce detailně rozeberou jednotlivé typy aktivních filtrů podle výše uvedeného rozdělení.

2.1.1 Paralelní filtr

Paralelní aktivní filtr (v zahraniční literatuře označovaný jako "shunt active power filter") je jednou ze dvou základních konfigurací (Obr.1) a může být použit v jednofázovém i třífázovém provedení. Tento typ aktivního filtru tvoří výkonový měnič (napěťový nebo proudový), který je ke kompenzované soustavě připojen paralelně. Pomocí výkonového měniče je do bodu připojení injektován požadovaný kompenzační proud. Měnič je od kompenzované soustavy často oddělen

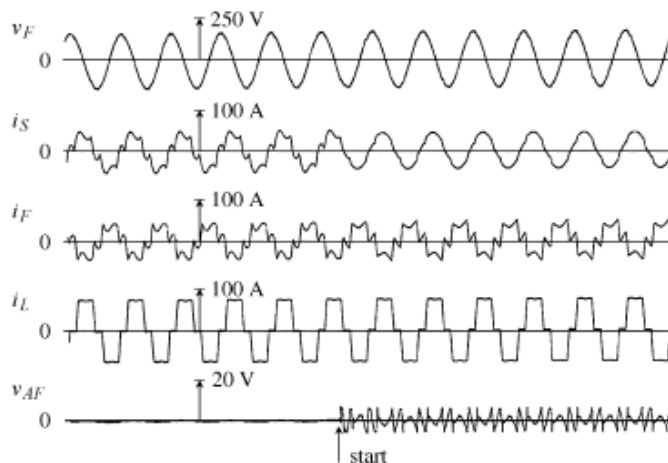
transformátorem a pasivním filtrem typu L, LC nebo LCL. V případě transformátoru jsou do pasivního filtru zahrnuty také rozptylové indukčnosti [4].

Funkce paralelního aktivního filtru je založena na práci s 1.harmonickou složkou proudu. Ta je odečtena od celkového neharmonického průběhu proudu a tak získány zbytkové složky proudu, které je potřeba kompenzovat. Za tímto účelem generuje paralelní aktivní filtr proud inverzní ke zbytkovým složkám. Po sečtení této dvojice proudů dojde k jejich vzájemné eliminaci.



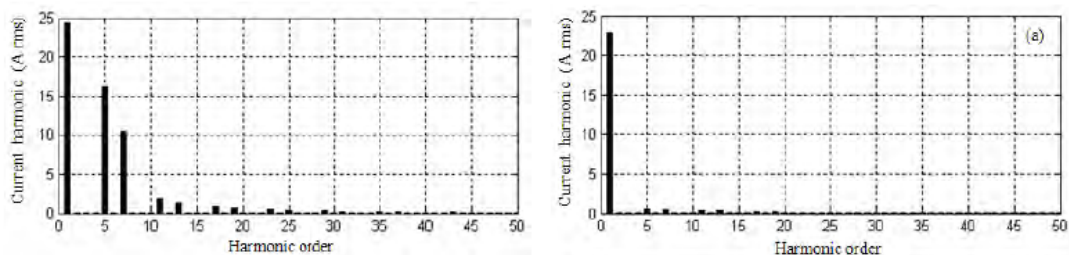
Obr. 1: Struktura paralelního aktivního filtru [4]

Na obr.2 je možno vidět jednotlivé průběhy proudů a napětí, tak jak jsou vyznačeny ve schématu aktivního filtru. Je zde patrná jednoznačná kompenzace průběhu proudu odebíraného ze zdroje v okamžiku spuštění aktivního filtru.



Obr. 2: Paralelní filtr - průběhy proudů a napětí [4]

Obr.3 ukazuje jednotlivá frekvenční spektra proudu před a po spuštění aktivního filtru. Z porovnání obou spekter je jasně patrná zejména eliminace 5. a 7. harmonické složky proudu.



Obr. 3: Spektrum proudu před a po filtraci [5]

Jednou z podstatných výhod paralelního aktivního filtru je schopnost kompenzace jalového výkonu, která je založena na principu redukce fázového posunu mezi napětím a proudem. Aktivní filtr v tomto režimu generuje na svém výstupu harmonický průběh proudu s daným fázovým posunem, který má opačný charakter než fázový posun proudu na zátěži. Celkový odebíraný proud ze zdroje, který je dán součtem proudů z filtru a zátěže, pak bude mít snížený (ideálně nulový) fázový posun proudu vůči napětí tj. dojde k redukci jalové složky celkového odebíraného výkonu.

Možnosti dalšího vývoje v oblasti paralelních aktivních filtrů z posledních let je možné najít například v [24] a [25] pro jednofázové filtry a [26],[27] pro třífázové.

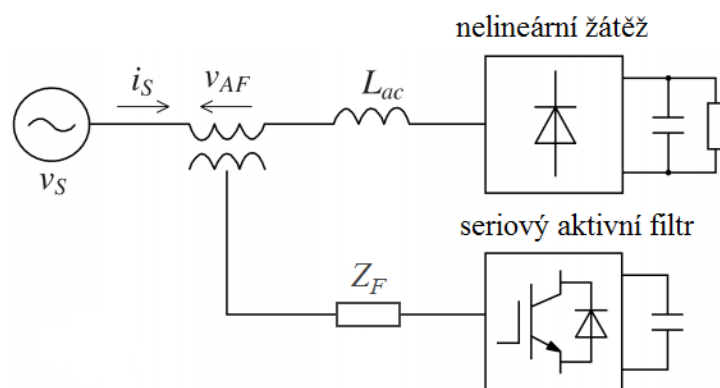
2.1.2 Sériový filtr

Sériový aktivní filtr (obr.4) nebo také kondicionér je filtrem napěťového typu tj. kompenzuje špičky a poklesy napětí, odstraňuje vyšší harmonické a symetrizuje napájení. Oproti paralelnímu aktivnímu filtru tento typ filtru neumožňuje práci s průběhem proudu, ale pouze s průběhem napětí.

Princip sériového aktivního filtru spočívá v generování definovaného/požadovaného napětí, které je přičteno k napětí sítě, ke které je připojen. Výsledné napětí na zátěži je součtem obou těchto napětí. Sériový aktivní filtr může být napájen z kompenzované sítě nebo z přídatného nezávislého zdroje [6].

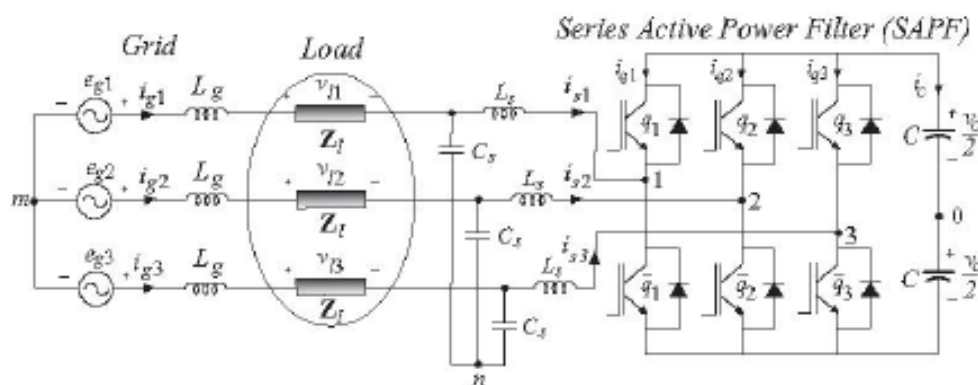
Na obr.4 je patrná zjednodušená struktura sériového aktivního filtru a způsob, jakým je daný typ filtru připojen k rozvodné soustavě. Je zde patrná nutnost propojení prostřednictvím transformátoru. Impedance Z_F představuje pasivní filtr typu L,LC případně LCL, který eliminuje pulzní průběh napětí způsobený výkonovým měničem.

Studie uvedená v [8] představuje možnost připojení sériového aktivního filtru bez použití izolačního transformátoru a aktivního DC zdroje. Příklad zapojení bez použití transformátoru je



Obr. 4: Struktura sériového aktivního filtru [4]

uveden na obr.5. Charakteristiky na obr. 6 uvádí porovnání spekter a průběhů napětí i proudů v zapojení sériového filtru bez transformátoru.



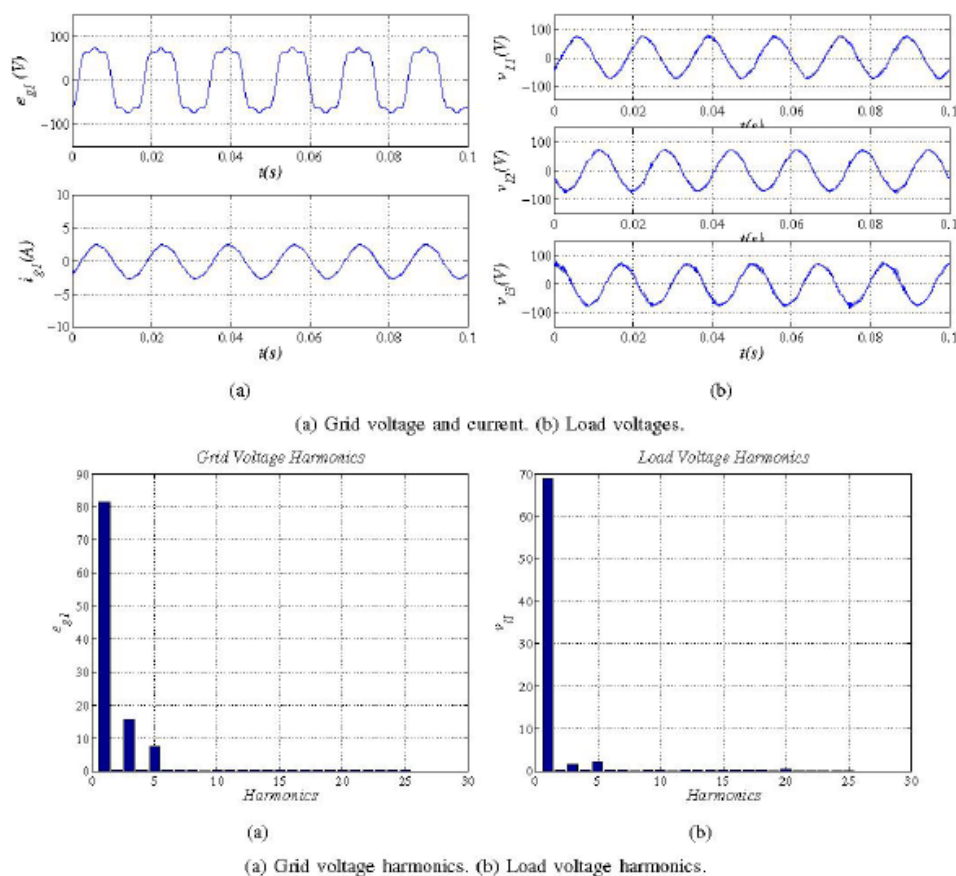
Obr. 5: Sériový filtr bez transformátoru [8]

Možnosti dalšího vývoje v oblasti sériových aktivních filtrů z posledních let je možné najít například v [28] a [29] pro jednofázový typ filtru.

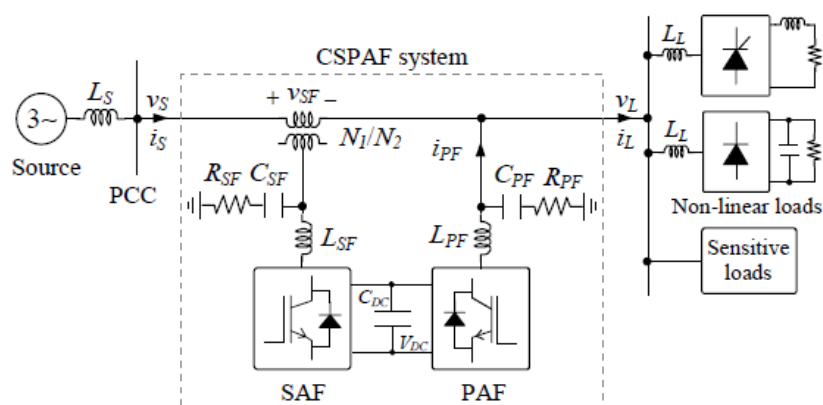
2.1.3 Kombinovaný filtr

Jak je patrné z obr.7, kombinovaný filtr nebo také CSPAF je založen na spojení obou základních typů aktivních filtrů - paralelního a sériového aktivního filtru. Díky tomuto spojení je výsledný filtr schopen kompenzovat napětí i proud tj. jak proudové tak napěťové vyšší harmonické složky. Alternativou k tomuto řešení je nahrazení paralelního aktivního filtru pasivním, jak je uvedeno v následující sekci - hybridní filtr.

Následující obr.8 představuje porovnání průběhů proudů jednotlivými fázemi na straně zdroje před a po provedení kompenzace. Z průběhů je patrné odstranění vyšších harmonických složek proudů.

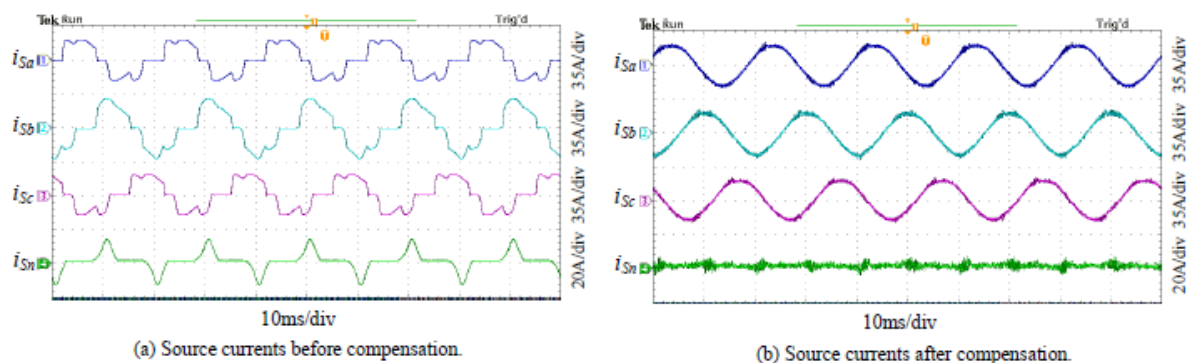


Obr. 6: Sériový filtr bez transformátoru - spektrum a průběhy [8]

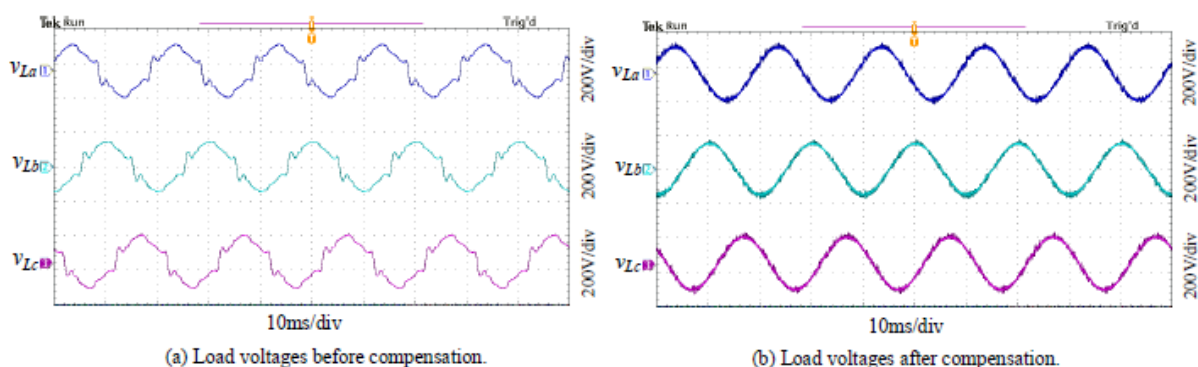


Obr. 7: Struktura CSPAF [30]

Obr.9 představuje porovnání průběhů napětí jednotlivých fází na straně zátěže před a po provedení kompenzace. Stejně jako v případě průběhů proudu i v tomto porovnání je patrné odstranění vyšších harmonických složek napětí.

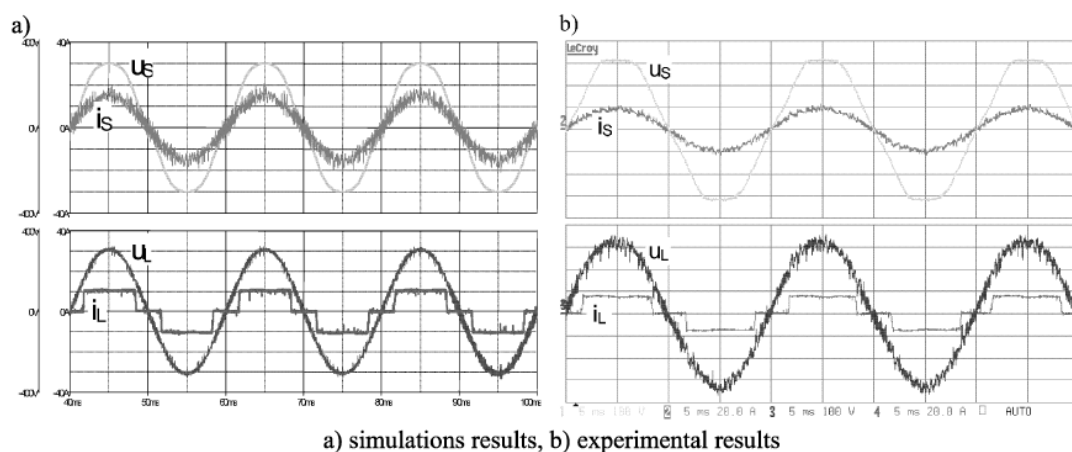


Obr. 8: CSPAFA - průběh kompenzace proudu [30]



Obr. 9: CSPAFA - průběh kompenzace napětí [30]

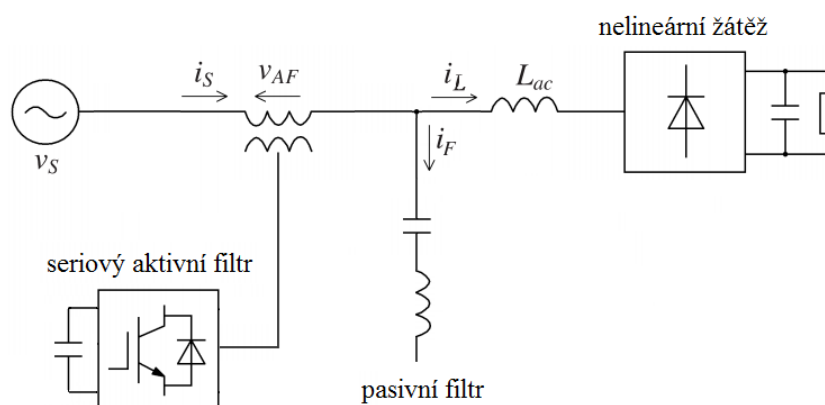
Obě předešlá porovnání jsou založena na experimentálním měření [30]. Následující charakteristiky (obr.10) porovnávají simulační a experimentální výsledky průběhů napětí i proudů při nasazení sério-paralelního (kombinovaného) aktivního filtru.



Obr. 10: CSPAFA - průběh kompenzace proudu a napětí [31]

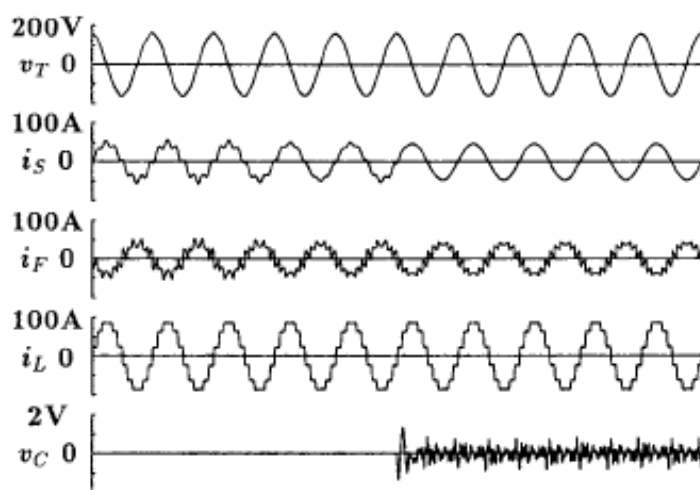
2.1.4 Hybridní filtr

Zapojení hybridního filtru je založeno na součinnosti sériového aktivního filtru a pasivního filtru. Toto spojení razantně snižuje nároky na část aktivního filtru v porovnání s použitím pouze jednoho z uvedených filtrů [7]. Pasivní LC filtr je nalaďený na určité dominantní harmonické složky proudu odebíraného zátěží (např. 5., 7. nebo vyšší harmonické složky). Sériový aktivní filtr zaručuje kompenzaci napěťové nesymetrie. Na obr.11 je patrná zjednodušená struktura hybridního filtru.



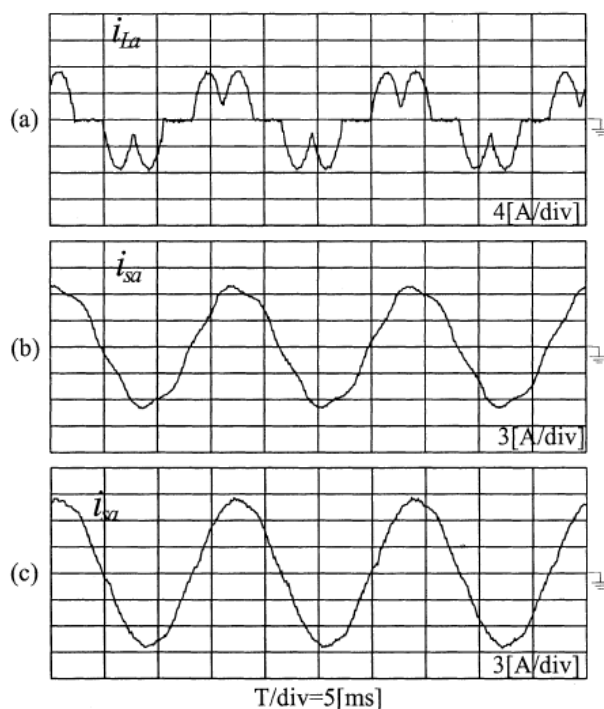
Obr. 11: Struktura hybridního aktivního filtru [6]

Obr. 12 ukazuje průběhy proudů a napětí ve struktuře hybridního aktivního filtru. V okamžiku spuštění procesu kompenzace je jasně patrné vyhlazení průběhu proudu zdroje.



Obr. 12: Hybridní filtr - průběhy proudů a napětí [7]

Na obr.13 je možné vidět porovnání proudu zátěží (a), proudu zdroje při použití pouze pasivního filtru (b) a proudu zdroje při použití pasivního filtru s aktivním dohromady (c). Z porovnání je vidět zlepšení průběhu proudu zdroje při použití hybridní struktury aktivního filtru.



Obr. 13: Hybridní filtr - porovnání proudů

Možnosti dalšího vývoje v oblasti hybridních aktivních filtrů z posledních let je možné najít například v [32] a [33].

2.2 Řídící algoritmy

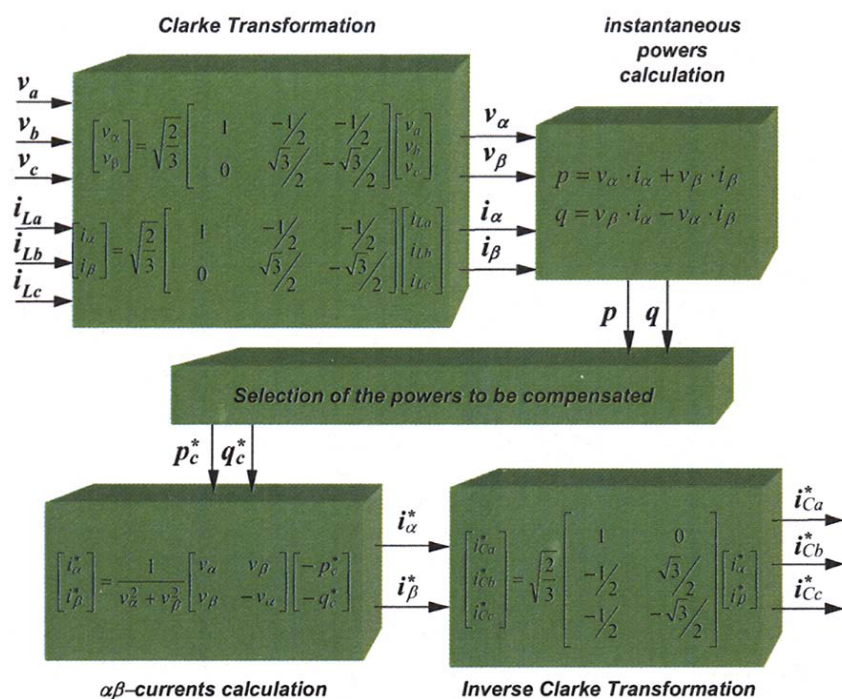
Následující sekce provedou podrobný rozbor jednotlivých řídicích algoritmů pro aktivní filtry.

2.2.1 P-Q teorie

Řídící algoritmus založený na P-Q teorii nebo též teorii okamžitých výkonů využívá takovou složku proudu, která je dle P-Q teorie zodpovědná za všechny jiné než činné složky okamžitého výkonu. Nejprve je proveden ve dvou krocích výpočet okamžitého činného (P) a okamžitého jalového (Q) výkonu. První krok spočívá v použití tzv. Clarkovi transformace - výkonově invariantní transformace ze souřadného systému a,b,c do souřadného systému α,β . Ve druhém kroku slouží získané složky napětí a proudu k výpočtu okamžitých hodnot p,q. Tyto výkony lze dále rozložit na konstantní a oscilační složku (DC a AC složka).

Následující krok řídicího algoritmu identifikuje složky proudu, které jsou zodpovědné za nežádoucí složky výkonu viz. [12]. Tento získaný proud je převeden pomocí inverzní Clarkovi transformace zpět ze souřadného systému α,β do systému a,b,c. Touto transformací vzniklé proudy i_a, i_b, i_c pak slouží jako reference pro měnič tj. paralelní aktivní filtr.

Obr.14 ukazuje blokové schéma řídicího algoritmu založeného na P-Q teorii.



Obr. 14: Blokové schéma řídicího algoritmu

Matematický popis Clarkova transformace definuje základní vztah (1) pro mapování okamžitých hodnot proudů a napětí z prostoru a,b,c do prostoru $\alpha,\beta,0$ [10].

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Maticová definice okamžitých složek činného výkonu P, jalového výkonu Q a nulových složek výkonu je uvedena v rovnici (2). Složky $\bar{p}, \bar{q}$ představují průměrné (konstantní) hodnoty činného a jalového výkonu. Složky $\tilde{p}, \tilde{q}$ reprezentují oscilační části těchto výkonů. Netočivá složka proudu i_0 , která je zodpovědná za složku p_0 , se nemůže uzavřít u třífázových systémů, kde není vyveden střed.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ v_\beta & -v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Rovnice (3) uvádí vztah pro výpočet kompenzačního proudu i_f podle [9], který je generován aktivním filtrem.

$$i_f = i_\beta - \frac{v_{1\beta} \cdot \bar{p}}{v_{1\alpha}^2 + v_{1\beta}^2} \quad (3)$$

Více o P-Q teorii a její aplikaci na jednofázové a třífázové aktivní filtry lze nalézt v [11], [12] a [13].

2.2.2 Metoda Fryze-Buchholz-Depenbrock

Metoda Fryze-Buchholz-Depenbrock (FBD) využívá jako základ dvojici teorií (Fryzova teorie dekompozice proudů a Buchholzova teorie okamžitých a efektivních hodnot) k definování nového způsobu dekompozice proudů.

Podle autorů teorie [15] může FBD metoda být obecně použita pro n-fázový systém a analýzu proudů, napětí a výkonů v těchto systémech.

Matematický popis podle [16] Metoda FBD definuje pro n-fázový systém tzv. kolektivní okamžité hodnoty napětí v_Σ a proudu i_Σ (4), dále také kolektivní okamžitý a činný výkon (5).

$$\mathbf{v}_* = \begin{bmatrix} v_{a*} \\ v_{b*} \\ v_{c*} \\ \vdots \\ v_{m*} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix}, \quad v_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^m v_{\mu*}^2}, \quad i_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^m i_\mu^2} \quad (4)$$

$$p_\Sigma = \mathbf{v}_* \cdot \mathbf{i}^t \quad P_\Sigma = \frac{1}{T} \int_0^T p_\Sigma dt \quad (5)$$

Na základě kolektivních okamžitých hodnot jsou pro periodické veličiny definovány kolektivní efektivní hodnoty napětí a proudu.

$$I_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_\Sigma^2 dt}, \quad V_\Sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_\Sigma^2 dt}, \quad (6)$$

Podle FBD metody okamžitý proud procházející každou fází systému i_μ lze dekomponovat na složky proporcionální a ortogonální k napětím. Metoda FBD dekomponuje proud na složky činné a nečinné, dále pak na složky výkonové, nevýkonové a oscilační. První složkou, která je dle FBD zodpovědná za přenos energie do zátěže, jsou činné proudy $i_{a\mu}$ jejichž definice je uvedena v (7).

$$i_{a\mu} = \frac{P_\Sigma}{V_\Sigma^2} v_{\mu*} = G_a v_{\mu*} \quad (7)$$

Další složkou jsou nečinné proudy $i_{n\mu}$. Ty jsou spojeny s výskytem rušení a oscilací, které ovlivňují okamžitý výkon, ale nepřenáší energii do zátěže (8).

$$i_{n\mu} = i_\mu - i_{a\mu} \quad (8)$$

Výkonné proudy $i_{p\mu}$ jsou zodpovědné za okamžitou hodnotu výkonu včetně možných oscilací spojených s nevyvážeností systému a výskytem harmonických (9).

$$i_{p\mu} = \frac{p_\Sigma}{v_\Sigma^2} v_{\mu*} = G_p v_{\mu*} \quad (9)$$

Nevýkonové proudy $i_{z\mu}$ nepřispívají k přenosu energie a mohou být okamžitě kompenzovány (10).

$$i_{z\mu} = i_{\mu} - i_{p\mu}. \quad (10)$$

Oscilační proudy $i_{v\mu}$ jsou zodpovědné za oscilace okamžité ekvivalentní vodivosti G_p kolem své průměrné hodnoty nebo také za kolísání okamžité hodnoty výkonu p_{Σ} (11).

$$i_{v\mu} = i_{p\mu} - i_{a\mu} = i_{n\mu} - i_{z\mu}. \quad (11)$$

Výsledná ortogonální dekompozice podle metody FBD je uvedena v (12).

$$\|i_{\mu}\|^2 = \|i_{a\mu}\|^2 + \|i_{n\mu}\|^2 = \|i_{a\mu}\|^2 + \|i_{v\mu}\|^2 + \|i_{z\mu}\|^2. \quad (12)$$

Podobně jako v případě P-Q teorie lze FBD metodu využít pro řízení aktivních filtrů. Díky dekompozici proudu na definované složky lze oddělit složky proudu odpovědné za přenos činného výkonu do zátěže a nežádoucí složky, které mohou být využity jako reference pro aktivní filtry. Více o FBD teorii lze nalézt jednak v [14], ale též v [15] a [16].

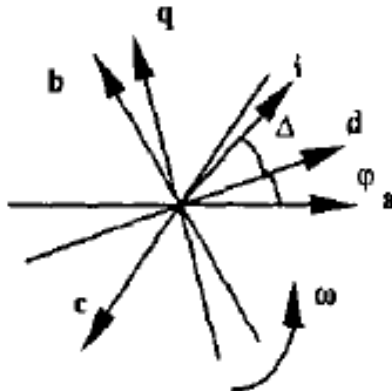
2.2.3 Vektorové řízení

Vektorové řízení je standardní technikou převážně využívanou v oblasti řízení pohonů. Hlavním důvodem častého využití tohoto způsobu řízení je fakt, že umožňuje odděleně regulovat složky proudu I_d , která je odpovědná za magnetický tok, a složky I_q , která je odpovědná za moment. Aplikace rotujícího souřadného systému (d-q) je v tomto případě s výhodou využíváno, protože jsou v něm výše zmíněné složky v ustáleném stavu konstantní a lze k jejich regulaci použít standardní PI regulátory.

Aplikace vektorového řízení na paralelní filtr Kompletní matematická formulace vektorového řízení a d-q metody určené pro paralelní filtr je rozvedena v [17]. Následující popis provádí stručný popis d-q metody.

Základní vztah mezi souřadným systémem a,b,c a systém d,q je zobrazen ve formě fázorového diagramu na obr.15. Osy souřadného systému d a q spolu s fázorem proudu rotují proti směru hodinových ručiček konstantní rychlostí ω zatímco koordináty souřadného systému a,b,c jsou statické. Vektor reprezentující proud i je tvořen dvojicí komponentů i_d a i_q v d-q souřadném

systému a 3 komponenty i_a, i_b, i_c v systému a,b,c. Úhel φ mezi osou d a osou a je úměrný času.



Obr. 15: Vektorové schéma d-q transformace [17]

Transformace ze souřadného systému a,b,c do systému d,q,0 je v maticovém tvaru popsána rovnicí (13). Tento typ transformace se nazývá Parkova a existuje ve 2 variantách. V uvedeném tvaru podle (13) je tzv. výkonově invariantní (aplikace této transformace zachovává velikost výkonů). Druhá varianta, která se liší pouze v koeficientu, zaručuje, že průmět rotujícího vektoru do reálné osy se shoduje s proudem i_a (tzn. $I_\alpha = i_a$).

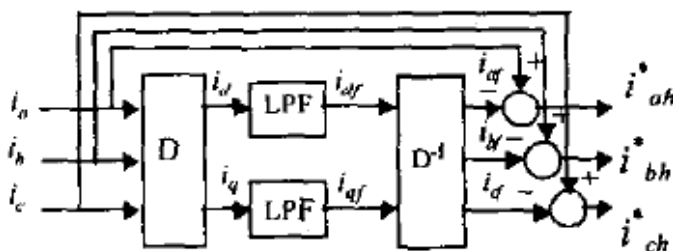
$$P = \begin{bmatrix} \sin n\omega t & \cos n\omega t & 0 \\ \cos n\omega t & \sin n\omega t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin n\omega t & \sin(n\omega t + 120n) & \sin(n\omega t + 240n) \\ \cos n\omega t & \cos(n\omega t + 120n) & \cos(n\omega t + 240n) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Inverzní Parkova transformace, která je nutná ke zpětné rekonstrukci jednotlivých složek proudu, má tvar podle rovnice (14).

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin n\omega t & \cos n\omega t & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin(n\omega t + 240n) & \cos(n\omega t + 240n) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin(n\omega t + 120n) & \cos(n\omega t + 120n) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Na obr.16 je patrné blokové schéma generování referenčního signálu pro aktivní filtr pomocí Parkovy transformace [17]. Vstupní proudy i_a, i_b, i_c jsou převedeny na složky d,q, které jsou zvlněné. To je způsobeno vyššími harmonickými složkami obsaženými ve vstupních proudech.

Zvlnění d, q složek je odfiltrováno dolnoproustným číslicovým filtrem (LPF). Tím se získají d, q složky, které odpovídají první harmonické (i_{df}, i_{qf}). Zpětnou Parkovou transformací jsou pak získány výstupní proudy i_{af}, i_{bf}, i_{cf} . Jejich odečtením od proudů sítě je získána reference proudu pro aktivní filtr.



Obr. 16: Generování referenčního signálu [17]

Více informací o aplikaci Parkovy transformace na paralelní aktivní filtr lze nalézt v [17].

2.2.4 Řízení s použitím Fourierovy transformace

V oblasti řízení aktivních filtrů lze využít Fourierovu transformaci a její modifikace několika způsoby. Prvním způsobem je využití transformace k výpočtu frekvenčních složek, které jsou obsaženy v průběhu proudu a z těchto složek poté poskládat referenční časový průběh tj. požadovaný proud pro aktivní filtr. Tento způsob je ovšem extrémně výpočetně náročný, protože se musí provést výpočet všech relevantních složek spektra.

Další způsob využití Fourierovy transformace je založen na identifikaci základní harmonické složky (složka 50Hz, bez ostatních složek spektra). Tato základní složka poslouží ke zrekonstruování časového průběhu proudu, který po odečtení od naměřeného proudu utvoří přímo referenční průběh pro aktivní filtr (výsledný průběh obsahuje pouze nežádoucí harmonické složky, které je potřeba odfiltrovat). Identifikace základní harmonické probíhá v reálném čase na základě pohyblivého vzorkovacího okna, ze kterého je prováděna diskretní Fourierova transformace (DFT). DFT je však použita pouze pro výpočet jedné, základní složky. Rovnice (15) představuje vztah, kterým je definována DFT.

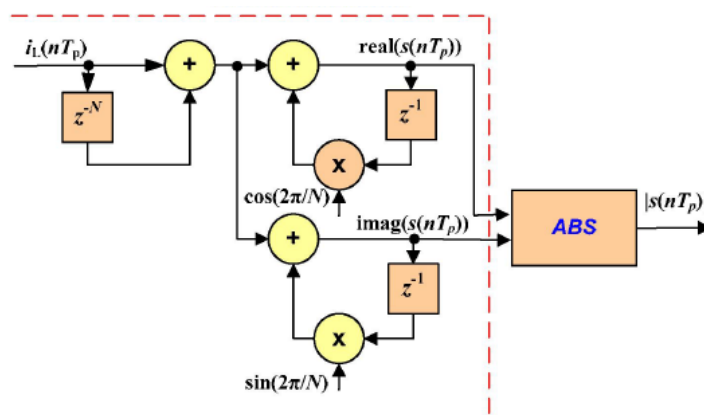
$$X_k \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi kn/N}, \quad k \in \mathbb{Z} \quad (15)$$

Použití rychlé Fourierovy transformace (FFT) má v případě aktivních filtrů 2 klíčové nevýhody. FFT nelze redukovat na výpočet pouze 1 složky, jak to lze provést u DFT. Druhou nevýhodou

FFT je potřebný počet vzorků vstupujících do transformace, který musí být roven 2^n . Tento požadavek vnáší do problému velké limitace z hlediska vzorkovací frekvence.

K řízení aktivních filtrů s použitím Fourierovy transformace lze přistoupit pomocí 2 způsobů - rekonstrukce referenčního signálu pro aktivní filtr z vypočítaného spektra nebo pomocí rekonstrukce základní harmonické a jejího odečtení od měřeného proudu.

Řízení aktivních filtrů s pomocí rekonstrukce základní harmonické je popsáno v [18]. Algoritmus v tomto případě využívá SDFT (Sliding DFT) pro rekonstrukci první harmonické v reálném čase. Obr.17 reprezentuje blokové schéma detektoru první harmonické, kde vstup tvoří proud zátěže a výstup spektrální složky první harmonické tohoto proudu.



Obr. 17: Detektor první harmonické [18]

Spektrální složky první harmonické proudu zátěže se dají určit pomocí rovnice (16).

$$s_1(nT_p) = s_1((n-1)T_p) \cdot e^{j2\pi/N} - i_{L1}((n-N)T_p) + i_{L1}(nT_p) \quad (16)$$

Diskrétní reprezentace první harmonické proudu zátěže je pak popsána rovnicí (17).

$$i_{h1}(nT_p) = 2/N |s_1(nT_p)| \sin(2\pi 50nT_p + \varphi_1) \quad (17)$$

Reprezentace kompenzačního proudu (18) je určena rozdílem mezi proudem zátěže a první harmonickou referenčního signálu.

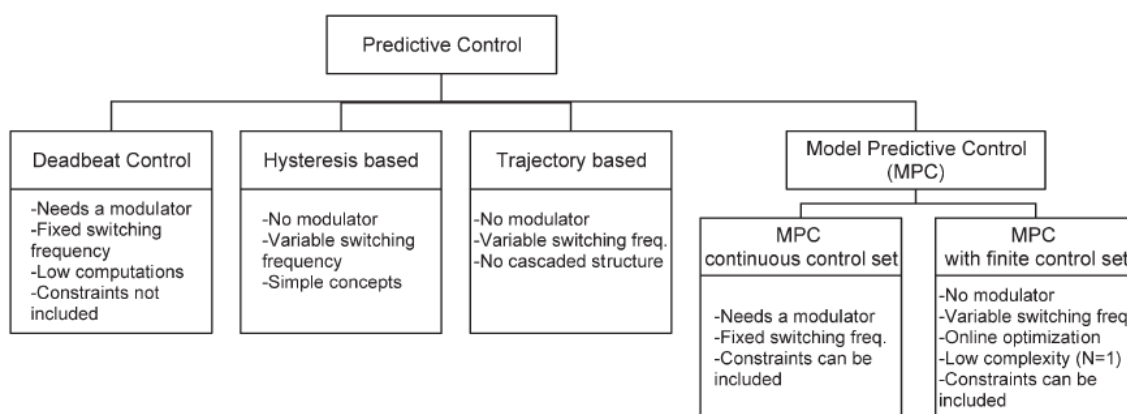
$$i_{C1}(nT_p) = i_{L1}(nT_p) - 2/N |s_1(nT_p)| \sin(2\pi 50nT_p + \varphi_2) \quad (18)$$

Dalším způsobem využití SDFT k řízení aktivního filtru je možné nalézt v [19]. V tomto případě je SDFT zkombinována s Clarkovou transformací (viz. P-Q teorie).

2.2.5 Prediktivní řízení

Prediktivní způsob řízení zahrnuje širokou třídu regulátorů, které našli v současné době uplatnění v oblasti řízení měničů. Prediktivní řízení je tedy jedním z možných způsobů aplikovatelných v oblasti aktivních filtrů. Rozdělení jednotlivých prediktivních metod řízení je uvedeno na obr.18.

Hlavní charakteristikou prediktivního způsobu řízení je použití modelu systému pro predikci budoucího chování regulovaných veličin tohoto systému. Tato informace je použita regulátorem k určení optimálního zásahu v závislosti na předdefinovaném optimalizačním kritériu [20].



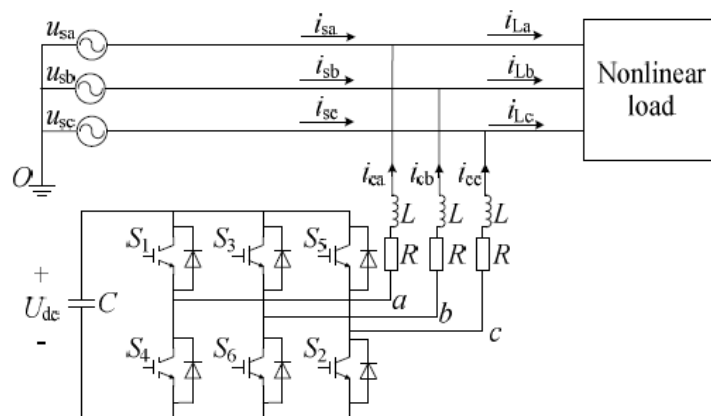
Obr. 18: Prediktivní řízení - rozdělení [20]

Následující kapitoly popisují detailněji prediktivní řízení typu MPC a to jednak zjednodušenou implementaci MPC a především pak verzi FCS-MPC.

MPC - Model Predictive Control Základem pro popis prediktivního způsobu řízení typu MPC je schéma zapojení aktivního filtru s jednotlivými veličinami. V tomto konkrétním případě se jedná o třífázové zapojení paralelního aktivního filtru (Obr.19).

Níže uvedená soustava diferenciálních rovnic (19) ukazuje napěťové poměry na jednotlivých fázích obvodu z pohledu zdroje.

$$\begin{aligned}
 u_{sa} &= L \frac{di_{ca}}{dt} + Ri_{ca} + u_a \\
 u_{sb} &= L \frac{di_{cb}}{dt} + Ri_{cb} + u_b \\
 u_{sc} &= L \frac{di_{cc}}{dt} + Ri_{cc} + u_c
 \end{aligned} \tag{19}$$

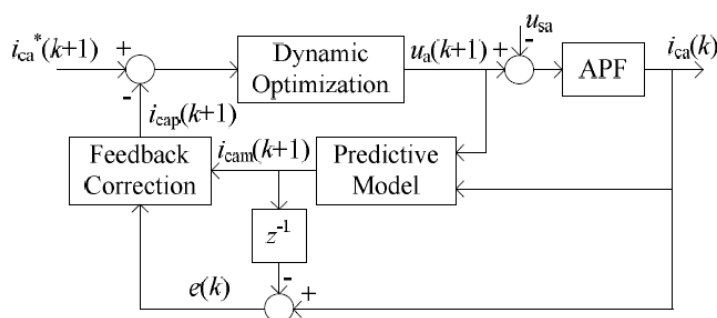


Obr. 19: MPC - zapojení aktivního filtru [21]

Vzhledem k tomu, že matematický popis všech 3 fází je stejný, bude se následující popis zabývat pouze jednou fází (a). Rovnice (20) představuje popis napěťových poměrů jedné fáze v diskretní podobě, kde k značí k -tou vzorkovací periodu.

$$u_a(k) = L \frac{i_{ca}(k) - i_{ca}(k-1)}{T_s} + Ri_{ca}(k) + u_{sa}(k) \quad (20)$$

Celkový blokový diagram prediktivního řízení typu MPC, který je uveden na obr.20, zobrazuje jednotlivé části. Jejich rozbor vycházející z [21] je proveden prostřednictvím následujícího matematického popisu.



Obr. 20: Blokový diagram prediktivního řízení pro APF [21]

Nejprve je potřeba sestavit prediktivní model, který vychází z výše uvedené rovnice pro napětí jedné fáze (20). Jednokrokový prediktivní model aktivního filtru pro výstupní proud může být

tedy popsán následující rovnicí (21).

$$i_{cam}(k+1) = ai_{ca}(k) + bu_a(k+1)$$

$$\alpha = L_m / (L_m + R_m T_s)$$

$$b = T_s / (L_m + R_m T_s)$$
(21)

Další část prediktivního řízení tvoří blok korekce zpětné vazby, který je možné popsat vztahem (22), kde h představuje korekční člen.

$$i_{cap}(k+1) = i_{cam}(k+1) + he(k)$$
(22)

Poslední částí prediktivního řízení, která zatím nebyla rozvedena, je část dynamické optimalizace. Pro popis této části je běžně používána vážená kvadratická funkce. Předpis této funkce, kde q a λ jsou váhové koeficienty, je uveden níže (23).

$$J = q[i_{cap}(k+1) - i_{ca}^*(k+1)]^2 + \lambda u_a^2(k+1)$$
(23)

Rovnice pro optimální řízení (24) může být odvozena od aplikování parciální derivace na předešlou rovnici (23).

$$\partial J / \partial u_a(k) = 0$$
(24)

Po aplikování parciální derivace na váženou kvadratickou funkci vznikne finální předpis popisující optimalizační část neboli optimalizační kritérium (25).

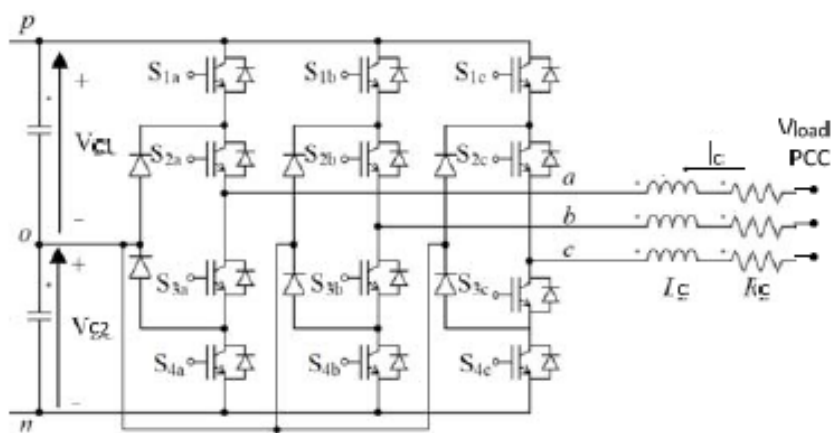
$$u_a(k+1) = \frac{qb}{\lambda + qb^2} [i_{ca}^*(k+1) - e(k) - ai_c(k)]$$
(25)

Další informace o použití MPC v oblasti aktivních filtrů je možné nalézt v [22].

FCS-MPC - Finite Control Set MPC Základem pro popis prediktivního způsobu řízení typu FCS-MPC je schéma zapojení aktivního filtru s jednotlivými veličinami podle [23]. V tomto konkrétním případě se jedná o třífázové zapojení paralelního aktivního filtru (Obr.21), kde je základ tvořen třífázovým měničem typu NPC (Obr.22). Zátěž je tvořena můstkovým usměrňovačem s RL zátěží. Řízení měniče použitého v tomto případě se skládá bloku regulátoru

[illegible]

Podrobné schéma zapojení NPC měniče je uvedeno na obr.22, kde je též patrné připojení měniče k síti přes sériové spojené L_c a R_c .



Aplikováním Kirchhoffových zákonů na zapojení NPC měniče lze získat rovnici modelu (26), kde i_c představuje kompenzační proud, V_{load} je PCC napětí (rovné napětí zátěže) a V_{switch} je napětí dodané měničem (závislé na stavu sepnutí a DC napětí kapacitorů).

$$L_c \frac{di_c}{dt} = R_c i_c + V_{load} - V_{switch} \quad (26)$$

Z rovnice modelu ve spojitém čase (26) může být vyjádřena ekvivalentní diskrétní forma (27) prediktivního modelu kompenzačního proudu, kde T_s je vzorkovací perioda.

$$i_c(k+1) = e^{-\frac{R_c T_s}{L_c}} i_c(k) + \frac{1}{R_c} (1 - e^{-\frac{R_c T_s}{L_c}}) (V_{load}(k) - V_{switch}(k)) \quad (27)$$

Úkolem blok FCS-MPC je udržet kompenzační proud i_c co možná nejblíže referenčnímu proudu, který je poskytnut separátním blokem, jak je to patrné z obr.21. Na stejnosměrné straně měniče lze napětí každého z dvojice kapacitorů určit ve spojitém čase ze vztahu (28), kde i_{DC} je proud procházející kapacitorem a může být určen použitím kompenzačního proudu i_c a stavu sepnutí.

$$V_c(t) - V_c(t_0) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i_{DC} dt \quad (28)$$

Ekvivalentní diskrétní model pro napětí kapacitorů je pak vyjádřeno v rovnici (29).

$$V_c(k+1) = V_c(k) + \frac{1}{C} i_{DC}(k) T_s \quad (29)$$

NPC měnič aplikuje na systém 19 napěťových vektorů (V_{switch}) skrze 27 možných stavů sepnutí. Z důvodu výběru nejlepšího stavu sepnutí v daný moment je optimalizační funkce definována následujícím vztahem (30), kde i_{ref} reprezentuje požadovaný referenční proud, který by měl být injektován do vedení. Parametr c_p představuje součet komutací potřebných při přechodu ze současného stavu do budoucího. Napětí na DC straně měniče je ve vztahu zastoupeno veličinami V_{c1} a V_{c2} . Koeficienty μ_1 a μ_2 určují relativní důležitost jedné proměnné na druhé.

$$J = |i_c - i_{ref}| + \mu_1 c_p + \mu_2 |V_{c1} - V_{c2}| \quad (30)$$

Následující část popisuje algoritmus FCS-MPC použitý k řízení aktivního filtru (pro nalezení nejlepšího stavu sepnutí) podle [23]:

1. použít stav sepnutí $S(t_k)$ vypočítaný v předchozím časovém intervalu a změřený kompenzační proud $i_c(t_k)$, napětí zátěže $V_{load}(t_k)$, a napětí kapacitorů $V_{c1}(k), V_{c2}(k)$
2. první predikce: predikce jeden krok vpřed pro určení kompenzačního proudu ($i_c(k+1)$) pomocí (27) a napětí kapacitorů ($V_c(k+1)$) pomocí (29)

3. druhá predikce: výpočet kompenzačního proudu a napětí kapacitorů v čas t_{k+2} pro 27 možných stavů sepnutí pomocí následující rovnice (31), kde $V_{load}(k+1)$ je predikce jeden krok vpřed pro napětí zátěže určená blokem opakované predikce a $i_{DC1}(k+1)$ a $i_{DC2}(k+1)$ jsou proudy skrz kapacitory [23]

$$\begin{aligned}
 i_c(k+2) &= e^{-\frac{R_c T_s}{L_c}} i_c(k+1) \\
 &+ \frac{1}{R_c} (1 - e^{-\frac{R_c T_s}{L_c}}) (V_{load}(k+1) - V_{switch}(k+1)) \\
 V_{c1}(k+2) &= V_{c1}(k+1) + \frac{1}{C} i_{DC1}(k+1) T_s \\
 V_{c2}(k+2) &= V_{c2}(k+1) + \frac{1}{C} i_{DC2}(k+1) T_s
 \end{aligned} \tag{31}$$

4. nalézt stav $S(t_{k+1})$, který minimalizuje optimalizační funkci J v čase t_{k+2} , kde $i_{ref}(k+2)$ je predikce referenčního proudu dva kroky vpřed.

$$\begin{aligned}
 J(k+2) &= |i_c(k+2) - i_{ref}(k+2)| + \mu_1 c_p \\
 &+ \mu_2 |V_{c1}(k+2) - V_{c2}(k+2)|
 \end{aligned} \tag{32}$$

5. počkat do t_{k+1} a poté přejít zpět na 1.krok algoritmu

3 Řízení toku výkonu v síti

Problematika řízení toku výkonu v síti je v současnosti velice aktuální téma obzvláště v souvislosti s rozvojem obnovitelných zdrojů elektrické energie, pro něž je charakteristické významné kolísání výkonu, závislé zejména na aktuálních povětrnostních podmínkách či intenzitě slunečního svitu.

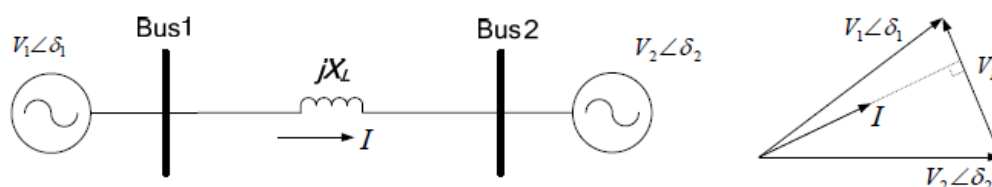
Obnovitelné zdroje energie kladou velké nároky na rozvodnou soustavu a její jednotlivé části. Z pohledu přenosu elektrické energie lze celou rozvodnou soustavu rozdělit na dílčí soustavy - přenosovou a distribuční. Přenosová soustava je používána pro dálkový přenos elektrické energie a představuje propojení na mezinárodní úrovni. Distribuční soustava je oproti tomu regionálního charakteru a je těsně spjata s koncovým uživatelem. Důležitou oblastí, kde je potřeba aktivně zasahovat do toku výkonu, je v oblasti přenosových soustav a to především z hlediska jejich řízení, vzájemného propojení jednotlivých částí ale také z pohledu dimenzování a stavby nových vedení v rámci rozvoje dané soustavy nebo územního celku.

Tok výkonu v síti je ovlivněn obecně 3 parametry - napětím, impedancí vedení a fázovým posunem. Řízení toku výkonu tedy obnáší manipulaci s jedním nebo více těmito parametry. Výběr parametrů, se kterými bude manipulováno, velmi závisí na účelu regulačního zásahu, protože činný a jalový výkon je ovlivněn změnou těchto parametrů. K manipulaci s parametry vedení slouží skupina zařízení označovaná souhrnně zkratkou FACTS (Flexible AC Transmission System) tedy flexibilní přenosový AC systém. Do této skupiny patří celá řada zařízení, které lze rozdělit podle způsobu připojení na vedení a provádění kompenzace tj. sériové, paralelní nebo jejich kombinace. Úkolem zařízení FACTS je kromě kompenzace napětí v síti také úprava účinníku sítě a obecně řízení toku činného a jalového výkonu.

V následující části je proveden teoretický rozbor sériové a paralelní kompenzace.

3.1 Kompenzace na přenosovém vedení

Na obr.23 je uveden zjednodušený model přenosového systému. Dvě rozvodné sítě jsou spojeny prostřednictvím přenosového vedení, které je předpokládáno jako bezztrátové a reprezentované reaktancí X_L . Veličiny $V_1 \angle \delta_1$ a $V_2 \angle \delta_2$ reprezentují fázory napětí dvou uzlů rozvodné sítě 1 a 2. Fázový posun mezi těmito body je $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Odpovídající fázorový diagram je uveden na obr.23.



Obr. 23: Přenosové vedení - schéma, fázový diagram [34]

Amplituda proudu přenosovým vedením je dána vztahem (33).

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2|}{X_L} \quad (33)$$

Činné a jalové složky proudu v uzlu 1 jsou dány vztahem (34).

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin \delta}{X_L}, \quad I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X_L} \quad (34)$$

Složky činného a jalového výkonu v uzlu 1 jsou pak dány součinem napětí V_1 a příslušné složky proudu (35).

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L}, \quad Q_1 = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \quad (35)$$

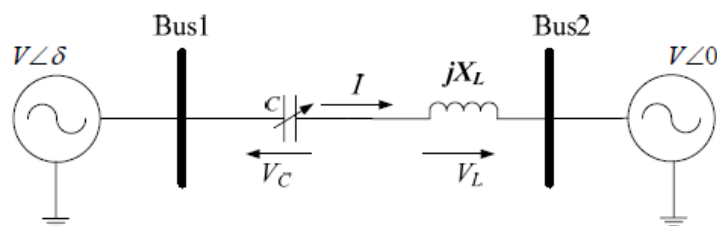
Obdobným způsobem lze získat činné a jalové složky proudu a výkonu pro uzel 2. Je potřeba pouze zaměnit jednotlivá napětí u vztahů (34) a (35). Z výše uvedených vztahů je patrné, že tok činného a jalového výkonu lze řídit prostřednictvím změny v napětí, fázovém posunu a impedance vedení v přenosovém systému. Obecně mohou být kompenzace v přenosových systémech rozděleny do 2 hlavních skupin - sériová a paralelní kompenzace.

3.1.1 Sériová kompenzace

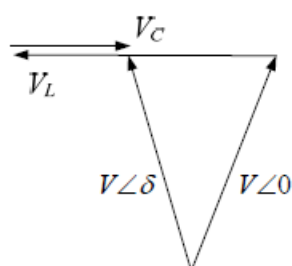
Úkolem sériové kompenzace je přímo řídit celkovou sériovou impedancí přenosového vedení. Přenos výkonu je omezen především sériovou reaktancí přenosového vedení. Napětí na sériově připojeném kondenzátoru je v protikladu k úbytku napětí na přenosovém vedení a tím dojde ke snížení sériové impedance vedení.

Zjednodušený model přenosového vedení se sériovou kompenzací je uveden na obr.24. Amplitudy napětí jsou předpokládána v obou uzlech rovna V a fázový posun mezi nimi je roven

δ . Přenosové vedení je předpokládáno jako bezztrátové a je reprezentováno reaktancí X_L . Řízený kondenzátor s napětím V_c je sériově připojen k přenosovému vedení a jak je patrné z fázorového diagramu (obr.25), snižuje úbytek napětí na vedení (způsobený reaktancí X_L).



Obr. 24: Sériová kompenzace - schéma [34]



Obr. 25: Sériová kompenzace - fázový diagram [34]

Rovnice (36) udává jednak vztah mezi reaktancí vedení X_L a reaktancí kompenzačního kondenzátoru X_c a zároveň vztah pro celkovou reaktanci vedení X .

$$\begin{aligned} X_c &= kX_L \\ X &= X_L - X_c = (1-k)X_L \end{aligned} \quad (36)$$

Činný výkon přenesený vedením je definován vztahem (37). Část jalového výkonu dodaná prostřednictvím kondenzátoru je určena vztahem (38).

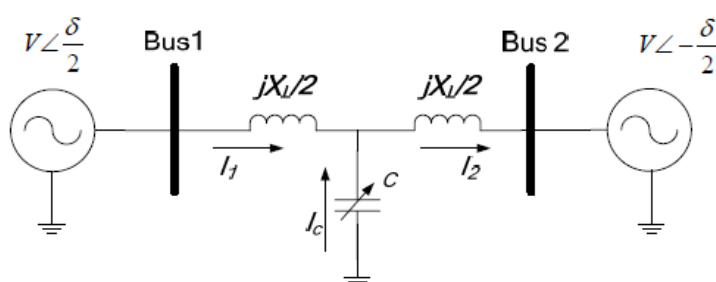
$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \quad (37)$$

$$Q_c = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (38)$$

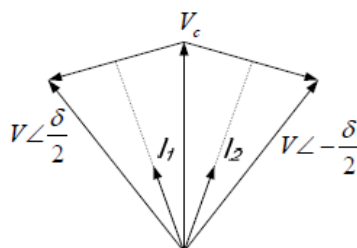
3.1.2 Paralelní kompenzace

Paralelní kompenzace ("shunt-type compensation") nachází široké uplatnění v přenosových systémech pro řízení amplitudy napětí, zlepšení kvality napětí a zvýšení stability systému.

Zjednodušený model přenosového systému s paralelní kompenzací je uveden na obr.26. Amplitudy napětí jsou předpokládána v obou uzlech rovna V a fázový posun mezi nimi je roven δ . Přenosové vedení je předpokládáno jako bezztrátové a je reprezentováno reaktancí X_L . Uprostřed přenosového vedení je připojen říditelný kondenzátor C . Amplituda napětí v bodě připojení je V_c a dosahuje stejné úrovně jako V . Fázorový diagram paralelní kompenzace je uveden na obr.27.



Obr. 26: Paralelní kompenzace - schéma [34]



Obr. 27: Paralelní kompenzace - fázový diagram [34]

Činný výkon v uzlu 1 a 2 dosahuje stejné úrovně a je dán vztahem (39).

$$P_1 = P_2 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (39)$$

Jalový výkon injektovaný prostřednictvím kondenzátoru za účelem řízení úrovně napětí uprostřed vedení je stanoven vztahem (40).

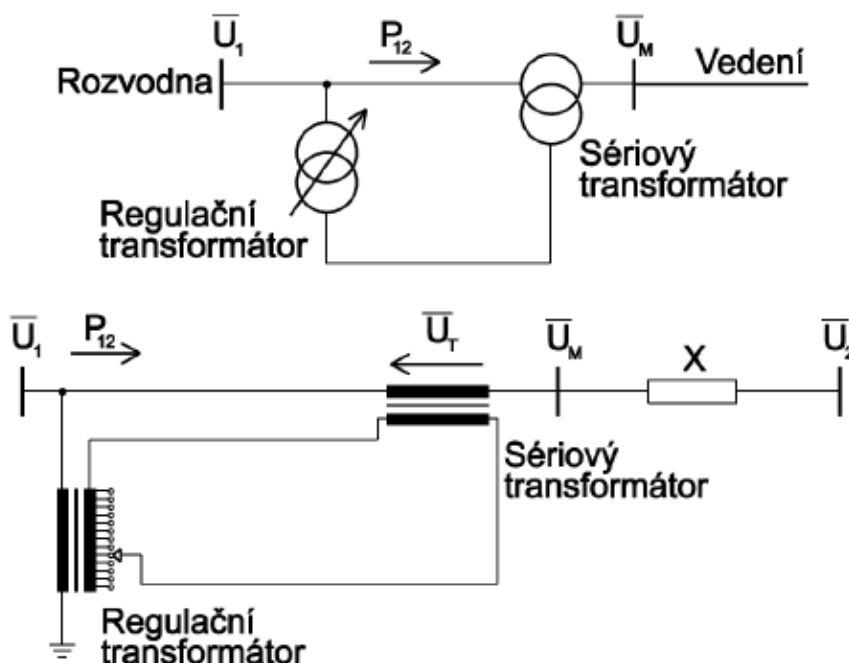
$$Q_c = 4 \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (40)$$

3.2 Zařízení FACTS

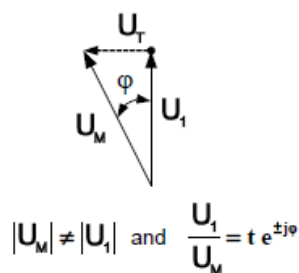
FACTS (Flexible AC Transmission System) je obecný flexibilní přenosový AC systém, jehož součástí je elektronické výkonové zařízení. Úkolem zařízení FACTS je zajistit regulovatelnost jednoho nebo více parametrů přenosového vedení za účelem dosažení vyšší kvality přenosu a zvýšení efektivity přenosu výkonu daného vedení, na které je zařízení FACTS připojeno. V současné době existuje celá řada modifikací těchto zařízení a následujících částech bude proto proveden rozbor pouze vybraných zařízení.

3.2.1 PST

Zařízení PST (Phase Shifting Transformer) nebo také transformátor s regulací fáze je jedno ze základních zařízení sloužících k řízení toku činného a jalového výkonu. Toho je dosaženo změnou fázového posuvu mezi napětími na začátku a konci vedení. Zařízení PST skládající se ze 2 transformátorů umožňuje řídit velikost i směr výkonových toků. První transformátor je zapojen jako regulační transformátor příčně (paralelně) k přenosovému vedení, ze kterého je získáváno fázové napětí. Přídavný druhý transformátor je umístěn v sérii s přenosovým vedením. Požadovaný fázový posun výsledného napětí $\bar{U}_M$ vzniká zavedením regulačního napětí $\bar{U}_T$ do sériového transformátoru [35].



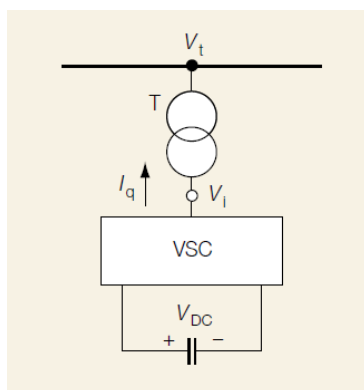
Obr. 28: Konfigurace zařízení PST [35]



Obr. 29: PST - fázorový diagram

3.2.2 STATCOM

Zařízení STATCOM (Static Synchronous Compensator) nebo také statický kompenzátor je založen na funkci synchronního napěťového zdroje jako analogie k synchronnímu stroji, který generuje vyváženou soustavu harmonických napětí se základní frekvencí s říditelnou amplitudou a fázovým úhlem. Z obr.30 je patrná základní konfigurace zařízení STATCOM, které se skládá z měniče, oddělovacího transformátoru a řídicí jednotky. Měnič u zařízení STATCOM může být jak napěťový (VSC) tak proudový (CSC).

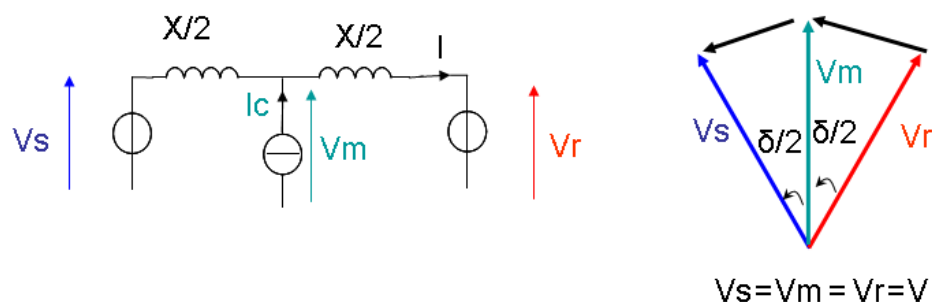


Obr. 30: Konfigurace zařízení STATCOM [40]

Základní funkcí zařízení STATCOM je provádění paralelní kompenzace, při které je odebírán proud požadované velikosti a fáze. STATCOM se může tedy vůči síti jevit například jako kondenzátor kompenzující účinník.

Obr.31 představuje fázorový diagram paralelní kompenzace spolu se zapojením zařízení STATCOM mezi zdroj a zátěž.

Porovnání zařízení STATCOM se zařízením SVC (Static Var Compensator), které není zahrnuto do tohoto výběru systémů FACTS, lze nalézt v [36].

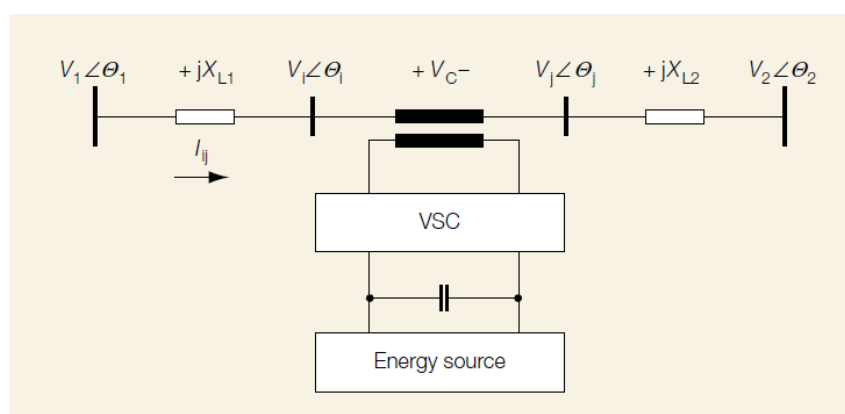


Obr. 31: STATCOM - fázorový diagram

3.2.3 SSSC

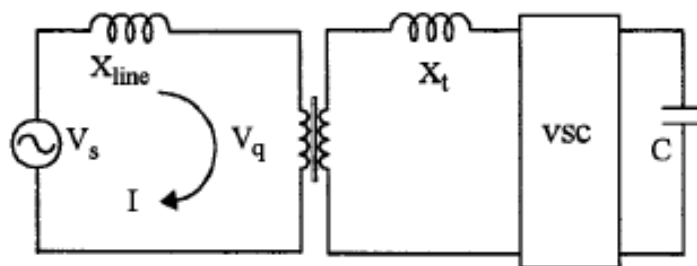
Zařízení SSSC (Static Synchronous Series Compensator) má obdobnou strukturu jako výše zmíněné zařízení STATCOM, což i patrné z obr.32. SSSC obsahuje napěťový měnič, který je připojen k soustavě přes sériový transformátor [37].

Zařízení SSSC může obsahovat jednak napěťový měnič (VSC) tak i proudový měnič (CSC). Obě tyto varianty jsou rozvedeny v [38] a [39].

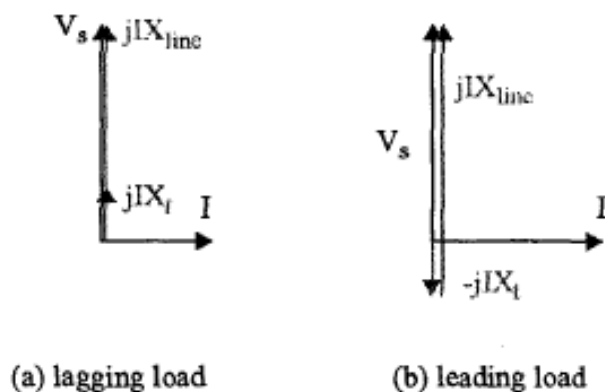


Obr. 32: Konfigurace zařízení SSSC [40]

Obr.33 představuje zjednodušené schéma zapojení SSSC a jednofázového přenosového vedení. Toto vedení může být považováno jako zdroj V_s v sérii s impedancí X_{line} . Veličina V_q představuje napětí injektované prostřednictvím oddělovacího transformátoru do vedení. V tomto případě zapojení SSSC je využito napěťového měniče, který dodává do obvodu buď jalový výkon kapacitního nebo induktivního charakteru. Střídavá strana měniče má impedanci X_t , která zahrnuje rozptylovou indukčnost transformátoru. Fázorové diagramy obou režimů práce jsou uvedeny na obr.34.



Obr. 33: SSSC - ekvivalentní schéma [37]



Obr. 34: SSSC - fázorový diagram [37]

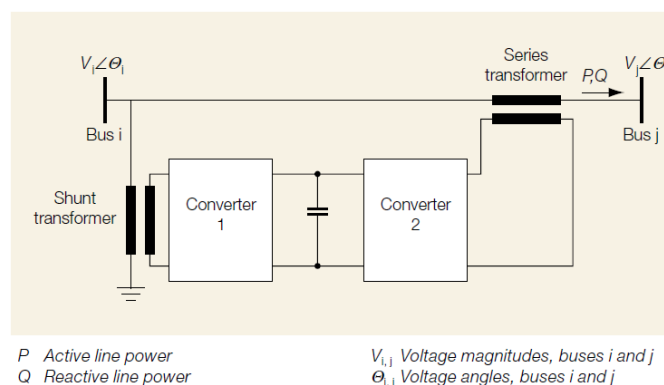
3.2.4 UPFC

Zařízení UPFC (Unified Power Flow Controller) je založeno na spojení dvojice měničů, které pracují do společného stejnosměrného meziobvodu. Konfigurace tohoto zařízení podle [40] je uvedena na obr.35.

První z měničů pracující jako řízený zdroj proudu provádí paralelní kompenzaci, kdy je z místa připojení odebírán proud požadované velikosti a fáze. Pomocí tohoto proudu je regulováno napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Druhý z měničů pracující jako řízený zdroj napětí pak provádí kompenzaci sériovou, kdy je generováno požadované napětí a prostřednictvím sériového transformátoru přičteno k napětí zdroje sítě.

Díky této uvedené konfiguraci měničů spojuje systém UPFC oba typy kompenzace - sériovou i paralelní.

Obr.36 představuje experimentální konfiguraci distribuční sítě s připojeným systémem UPFC. Daná distribuční síť se skládá z dvojice radiálních vedení. Obě tyto vedení mají své napájecí zdroje, které mají stejnou amplitudu napětí ale rozdíl 10° ve fázi. Použitá radiální vedení mohou být transformována do uzavřené smyčky pomocí paralelního spojení zátěží R_{L1} a R_{L2} .

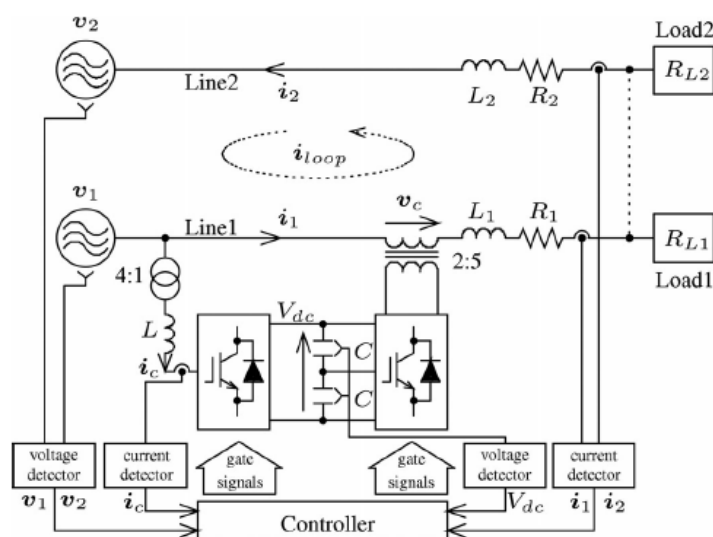


Obr. 35: Konfigurace zařízení UPFC [40]

Za účelem řízení systému UPFC z pohledu kompenzace napětí na vedení je zapotřebí detekovat všechny proudy ve vedení (i_1, i_2), proud celé smyčky (i_{loop}) a napájecí napětí (v_1, v_2). Z těchto veličin je určena pomocí rovnice (41) velikost referenčního napětí v_c pro sériový měnič.

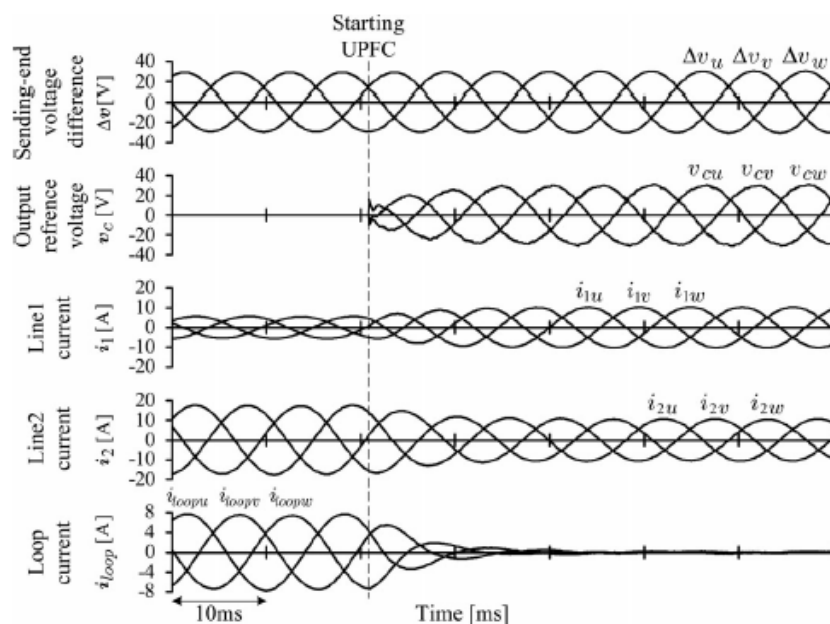
$$v_c = \sum_{i=1}^3 L_i \frac{di_i}{dt} + (v_2 - v_1) \quad (41)$$

Systém UPFC je v dané konfiguraci považován za napěťový zdroj, který kompenzuje úbytek napětí na indukčnosti vedení a zajišťuje rovnoměrné zatížení obou experimentálních vedení.



Obr. 36: UPFC - experimentální konfigurace [41]

Obr.37 představuje průběhy napětí a proudů, které byly získány experimentem. Z průběhů je patrné, že po spuštění systému UPFC je eliminován proud smyčky i_{loop} a tím také dochází k vyrovnaní velikosti proudů i_1 a i_2 v jednotlivých vedeních. V uvedené experimentální soustavě



Obr. 37: UPFC - průběhy experimentu [41]

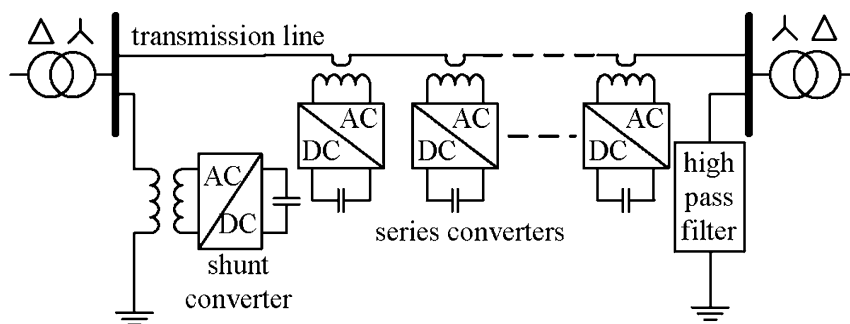
s výkonem 6kVA při napětí 200V byly celkové ztráty na měničích systému UPFC 83.6W. Celý experiment je podrobně rozveden v [41]. Další informace o systému UPFC je možné nalézt v [42] a [43].

3.2.5 DPFC

Zařízení DPFC (Distributed Power Flow Controller) je v principu odvozeno od předchozího systému - UPFC. Za účelem zajištění větší spolehlivosti a snížení ceny byly na systém UPFC aplikovány dvě modifikace. První modifikace spočívá v eliminaci společného stejnosměrného meziobvodu. Druhá modifikace systému UPFC se pak týká rozdělení sériového měniče. Kombinací obou těchto změn vzniká samotný systém DPFC.

Systém DPFC se skládá z jednoho paralelního (shunt) a několika sériových měničů. Paralelní měnič je obdobný jako u systému STATCOM, zatímco sériový měnič využívá koncept tzv. D-FACTS (Distributed FACTS), který je založen na použití více jednofázových měničů namísto jednoho měniče o velkém výkonu. Každý z měničů v systému DPFC je nezávislý a má svůj vlastní zdroj stejnosměrného napětí. Konfigurace systému DPFC podle [44] je uvedena na obr.38.

Jak je možné vidět z konfigurace systému, kromě klíčových částí (paralelní a sériový měnič) vyžaduje DPFC dvojici transformátorů $Y - \Delta$ zapojených na obou koncích vedení za účelem



Obr. 38: Konfigurace zařízení DPFC [44]

izolace 3.harmonické složky od okolí a filtr připojený na opačné straně vedení než systém DPFC.

Systémy UPFC se vyznačují propojením paralelního a sériového měniče, které umožňuje volnou výměnu činného výkonu. K zajištění stejné funkcionality u systému DPFC je nezbytnou podmínkou umožnit výměnu činného výkonu mezi měniči i v případě eliminovaného společného stejnosměrného meziobvodu.

Z konfigurace systému DPFC je patrné propojení pouze střídavé strany paralelního měniče se střídavou stranou sériových měničů a to prostřednictvím přenosového vedení. Přenos činného výkonu není tedy realizován přes společný stejnosměrný meziobvod, jako je tomu u systémů UPFC, ale prostřednictvím přenosového vedení pomocí 3.harmonické složky. Tato metoda je založena na přenosu činného výkonu pomocí vyšších harmonických složek. Tento přenos je vyjádřen vztahem (42), kde V_i a I_i jsou napětí a proud i -té harmonické složky a ϕ_i je odpovídající fázový posun.

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} V_i I_i \cos \phi_i \quad (42)$$

Z rovnice (42) je patrné, že složky činné výkonu na rozdílných frekvencích jsou od sebe navzájem izolovány. Napětí či proud o jedné frekvenci nemá žádný vliv na složku činného výkonu s odlišnou frekvencí. Nezávislost složek činného výkonu na rozdílných frekvencích dává možnost, že měnič bez zdroje energie může generovat činný výkon o jedné frekvenci a absorbovat tento výkon z jiných frekvencí.

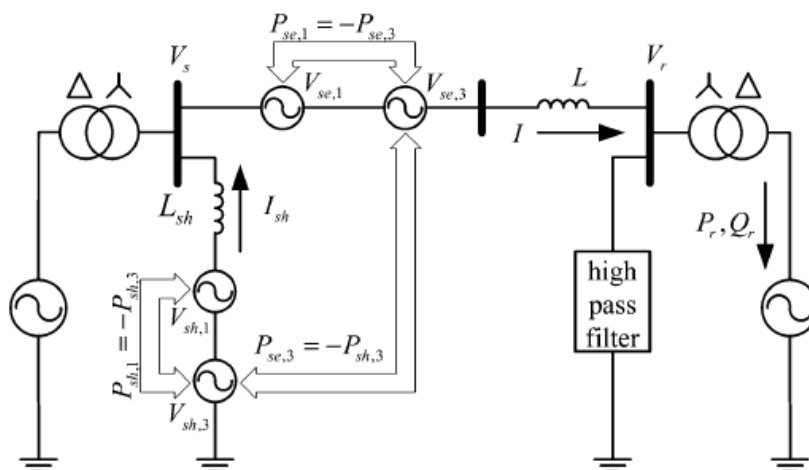
Aplikováním této metody na systém DPFC může paralelní měnič absorbovat činný výkon o základní frekvenci z rozvodné sítě a injektovat proud o dané harmonické frekvenci zpět do rozvodné sítě. Tento proud bude proudit skrz přenosové vedení. Podle potřebného množství činného výkonu na základní frekvenci generují sériové měniče systému DPFC harmonické na-

pětí, čímž absorbují činný výkon z harmonických složek. Při zanedbání ztrát měniče činný výkon generovaný na základní frekvenci odpovídá výkonu absorbovanému z harmonické složky.

Systém DPFC obsahuje filtr typu horní propust, který blokuje základní harmonickou a umožňuje průchod vyšších harmonických složek. Filtr spolu s měniči a zemním spojením tvoří uzavřenou smyčku pro harmonický proud.

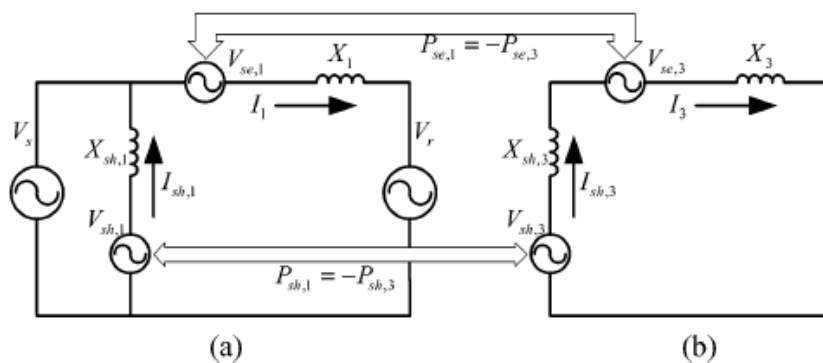
Třetí harmonická složka je díky svým vlastnostem vybrána k přenosu výkonu v systému DPFC. Ve třífázovém systému tvoří třetí harmonická netočivou složku, jejíž přenos je blokován transformátorem $Y - \Delta$. Tím je zamezeno proniknutí této složky do zbytku rozvodné sítě. Teoreticky může být pro přenos výkonu v systému DPFC použita libovolná harmonická složka (3., 6., 9. a vyšší). Třetí harmonická složka byla v [44] zvolena jako ideální. Důvodem je porovnání impedancí vedení pro jednotlivé harmonické složky, kde třetí harmonická dosáhla nejnižší úrovně.

Na obr.39 je uvedena zjednodušená reprezentace systému DPFC [44], který je umístěn mezi dva zdroje - na vysílací straně V_s a na přijímací straně V_r . Přenosové vedení je v tomto schématu nahrazeno indukčností L . Napětí injektovaná sériovými měniči systému DPFC jsou $V_{se,1}$ (základní frekvence) a $V_{se,3}$ (3.harmonická). Paralelní měnič je připojen prostřednictvím indukčnosti L_{sh} a generuje napětí $V_{sh,1}$ a $V_{sh,3}$. Proud injektovaný paralelním měničem je označen jako I_{sh} . Tok činného a jalového výkonu je označen jako P_r a Q_r . Na základě teorému



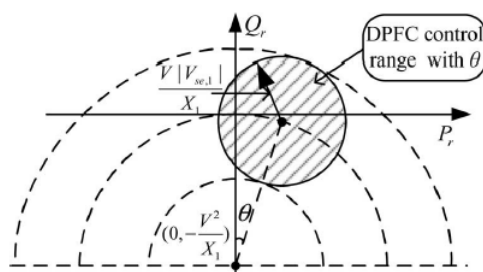
Obr. 39: DPFC - reprezentace [44]

o superpozici je možné schéma z obr.39 rozdělit na 2 samostatné obvody s rozdílnou frekvencí (viz. obr.40). Obvody jsou od sebe navzájem izolovány a jediné spojení je prostřednictvím výkonové rovnováhy každého měniče systému DPFC. Schopnost řízení toku výkonu může být u systému DPFC ilustrována prostřednictvím činného P_r a jalového Q_r výkonu. Obr.41



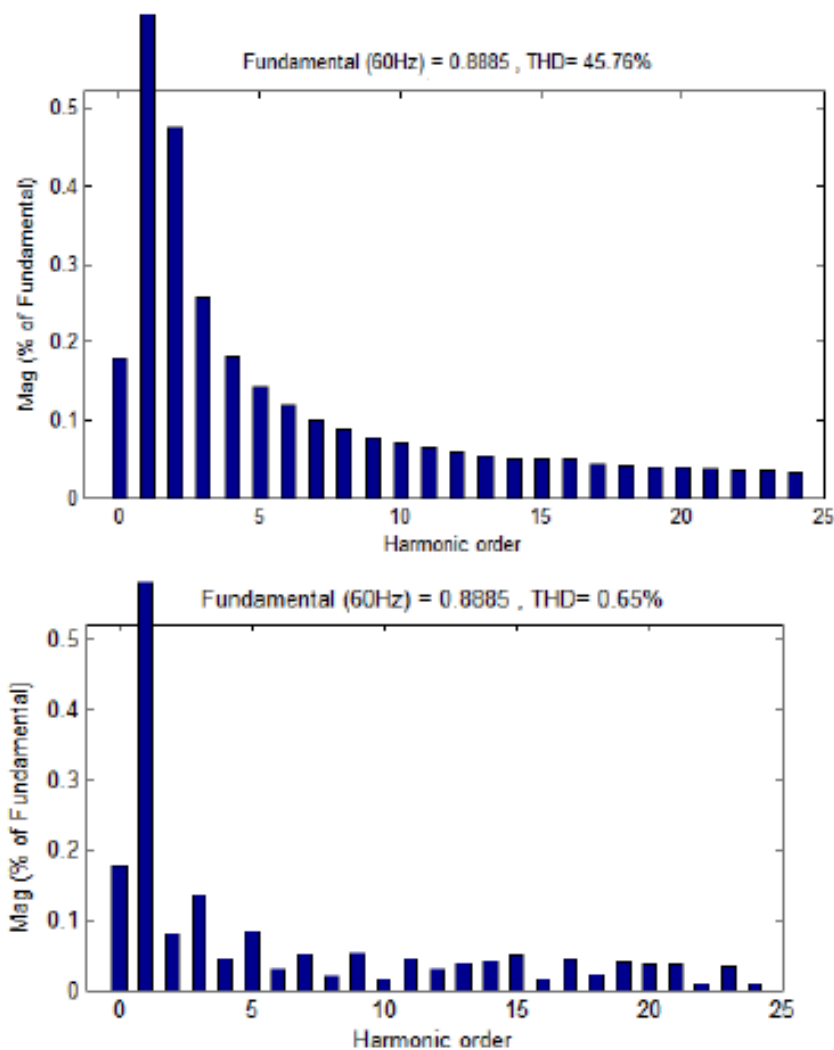
Obr. 40: DPFC - ekvivalentní schéma [44]

představuje pracovní rozsah regulace činného a jalového výkonu u systému DPFC s vyznačeným úhlem přenosu θ .



Obr. 41: DPFC - pracovní rozsah [44]

Detailní rozbor režimu práce systému DPFC je uveden v [44]. Experimentální použití tohoto systému z pohledu zlepšení kvality elektrické energie je pak představeno v [45]. Výstupy experimentu je možné nalézt na obr.42 a jsou reprezentovány formou analýzy harmonických složek v napětí zátěže. Z uvedených charakteristik je patrné výrazné snížení podílu vyšších harmonických složek. To dokazuje především parametr THD.

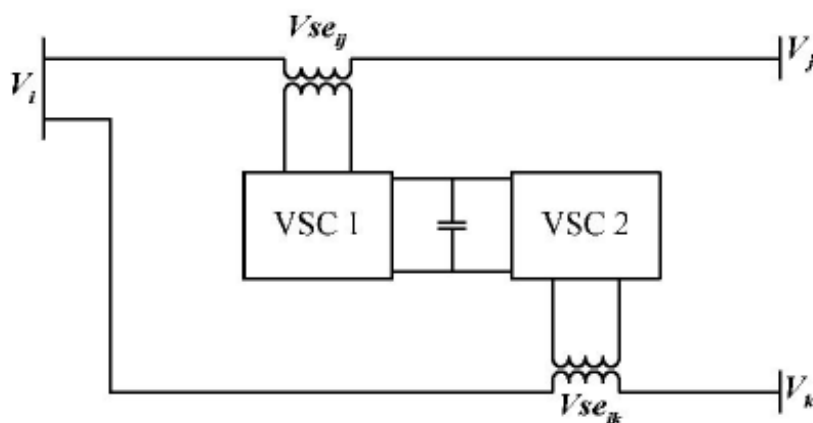


Obr. 42: DPFC - výstup experimentu [45]

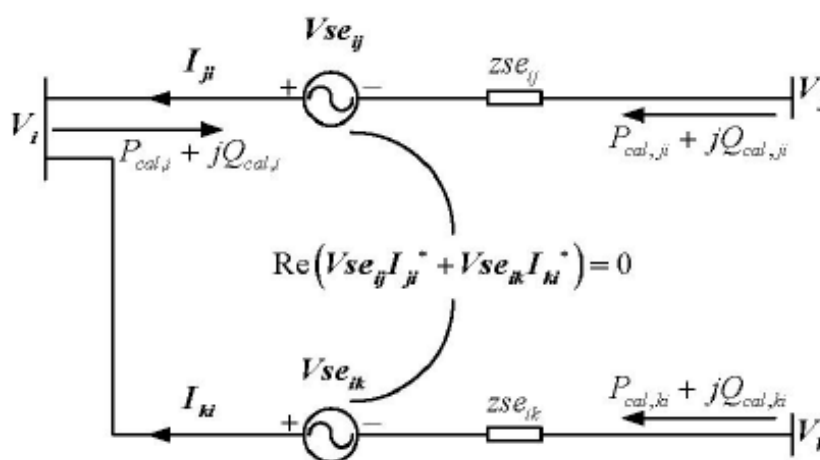
3.2.6 IPFC

Zařízení IPFC (Interline Power Flow Controller) patří do vybrané skupiny systémů FACTS a jeho struktura je odvozena od systému UPFC. Na rozdíl od předchozích systémů pracuje systém IPFC na dvou nebo více vedeních. Nejjednodušší systém IPFC, který obsahuje dvojici napěťových měničů, je sériově připojen mezi 2 přenosová vedení prostřednictvím sériových transformátorů. Tato konfigurace IPFC podle [46] je ukázána na obr.43.

Jak je patrné z obr.43, zařízením IPFC lze provádět sériovou kompenzaci současně na dvou vedeních a realizovat přenos výkonu přes stejnosměrný meziobvod. Říditelná napětí V_{seij} a V_{seik} reprezentují výstupy jednotlivých měničů. V ekvivalentním schématu systému IPFC na obr.44 jsou uvedeny těž impedance Z_{seij} a Z_{seik} , které ve schématu zastupují sériové transformátory.



Obr. 43: Konfigurace zařízení IPFC [46]



Obr. 44: IPFC - ekvivalentní schéma [46]

Činný a jalový výkon přenesený přes 2 větve vedení i je zastoupen ve schématu veličinami $P_{cal,i}, Q_{cal,i}$. Veličiny $P_{cal,xi}$ a $Q_{cal,xi}$ ($x = j, k$) představují přenesený výkon přes vedení j a k . Činný výkon lze přenášet mezi jednotlivými vedeními prostřednictvím stejnosměrného meziobvodu, který spojuje napěťové měniče. Soustava rovnic (43), která je odvozena od ekvivalentního

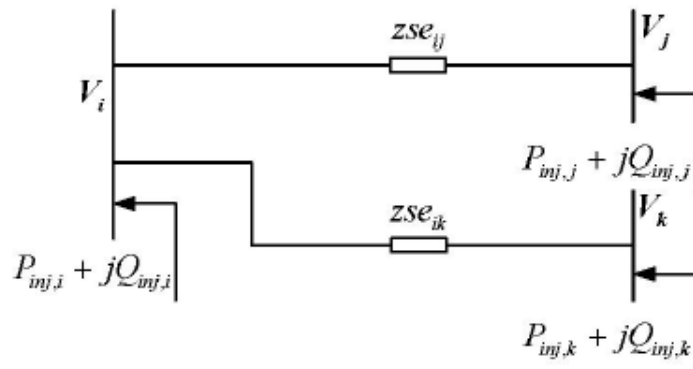
schématu, popisuje výkonové toky v každé části vedení [46].

$$\begin{aligned}
 P_{cal,i} &= V_i^2 g_{ii} - \sum_{n=j,k} V_i V_n [g_{in} \cos(\theta_i - \theta_n) + b_{in} \sin(\theta_i - \theta_n)] - \sum_{n=j,k} V_i V_{se_n} [g_{in} \cos(\theta_i - \theta_{se_n}) + b_{in} \sin(\theta_i - \theta_{se_n})] \\
 Q_{cal,i} &= -V_i^2 b_{ii} - \sum_{n=j,k} V_i V_n [g_{in} \sin(\theta_i - \theta_n) - b_{in} \cos(\theta_i - \theta_n)] - \sum_{n=j,k} V_i V_{se_n} [g_{in} \sin(\theta_i - \theta_{se_n}) - b_{in} \cos(\theta_i - \theta_{se_n})] \\
 P_{cal,n} &= V_n^2 g_{nn} - V_i V_n [g_{in} \cos(\theta_n - \theta_i) + b_{in} \sin(\theta_n - \theta_i)] + V_n V_{se_m} [g_{nm} \cos(\theta_n - \theta_{se_m}) + b_{nm} \sin(\theta_n - \theta_{se_m})] \\
 Q_{cal,n} &= -V_n^2 b_{nn} - V_i V_n [g_{in} \sin(\theta_n - \theta_i) - b_{in} \cos(\theta_n - \theta_i)] + V_n V_{se_m} [g_{nm} \sin(\theta_n - \theta_{se_m}) - b_{nm} \cos(\theta_n - \theta_{se_m})] \\
 g_{ii} &= \sum_{n=j,k} g_{in}, \quad b_{ii} = \sum_{n=j,k} b_{in}, \quad g_{in} + jb_{in} = 1/z_{se_{in}} = y_{se_{in}}, \quad g_{nm} + jb_{nm} = 1/z_{se_{nm}} = y_{se_{nm}}, \quad n=j, k
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Za předpokladu bezeztrátových měničů je dodaný činný výkon jednomu měniči roven činnému výkonu, který je požadován druhým měničem. Tento předpoklad (44) platí, pokud není v systému žádný akumulční prvek.

$$\operatorname{Re}(V_{se_{ij}} I_{ji}^* + V_{se_{ik}} I_{ki}^*) = 0 \tag{44}$$

Na obr.45 je uvedeno schéma injecktáže výkonů prostřednictvím systému IPFC. Toto schéma slouží k rozvedení konvenčního přístupu uvedeného výše. Následující popis systému IPFC je zaměřen na výkonové poměry při stejné konfiguraci systému a vedení.



Obr. 45: IPFC - schéma injecktáže [46]

Soustava rovnic (45) se vztahuje ke schématu injecktáže a definuje vztahy pro jednotlivé výkony injecktované do každého vedení [46].

$$\begin{aligned}
 P_{inj,i} &= \sum_{n=j,k} V_i V_{se_{in}} \left[g_{in} \cos(\theta_i - \theta_{se_{in}}) + b_{in} \sin(\theta_i - \theta_{se_{in}}) \right] \\
 Q_{inj,i} &= \sum_{n=j,k} V_i V_{se_{in}} \left[g_{in} \sin(\theta_i - \theta_{se_{in}}) - b_{in} \cos(\theta_i - \theta_{se_{in}}) \right] \\
 P_{inj,n} &= -V_n V_{se_{in}} \left[g_{in} \cos(\theta_n - \theta_{se_{in}}) + b_{in} \sin(\theta_n - \theta_{se_{in}}) \right] \\
 Q_{inj,n} &= -V_n V_{se_{in}} \left[g_{in} \sin(\theta_n - \theta_{se_{in}}) - b_{in} \cos(\theta_n - \theta_{se_{in}}) \right] \\
 n &= j, k
 \end{aligned} \tag{45}$$

Rovnice (46) udává výsledné výkonové poměry na jednotlivých částech vedeních, kde P_g a Q_g je generovaný činný a jalový výkon. Zbylé veličiny jsou výkony na zátěži (P_l , Q_l) a ztráty na vedení (P_{line} , Q_{line}).

$$\begin{aligned}
 P_{gm} + P_{inj,m} - P_{lm} - P_{line,m} &= 0 \\
 Q_{gm} + Q_{inj,m} - Q_{lm} - Q_{line,m} &= 0 \\
 m &= i, j, k
 \end{aligned} \tag{46}$$

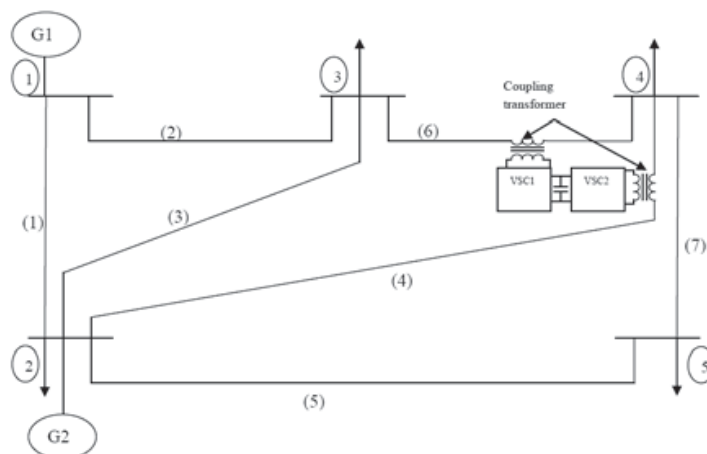
Následující rovnice (47) platí, pokud budou sériové transformátory předpokládány jako zařízení s nulovou rezistivitou. Ze vztahu je vidět, že součet jednotlivých injecktovaných výkonů je roven nule.

$$\sum_{m=i,j,k} P_{inj,m} = 0 \tag{47}$$

Na obr.46 je uvedeno experimentální zapojení systému IPFC v síti, která se skládá z dvojice generátorů, 5 uzlů a 7 přenosových vedení mezi nimi. Systém IPFC je zapojen mezi linky 4 a 6.

Dosažené výsledky experimentálního zapojení jsou shrnuty na obr.47 a obr.48. Nejprve je vyhodnocen napěťový profil sítě v jednotlivých uzlech s připojeným a odpojeným IPFC. Je patrné, že při použití IPFC se rozdíl v úrovních jednotlivých napětí snížil.

Další vyhodnocení se týká výkonových poměrů na všech vedeních (obr.48). Zde je možné vidět, že při použití IPFC došlo ke zvýšení přenášeného činného výkonu především na vedeních, kde je systém připojen. Ovlivněn byl též přenos jalového výkonu.



Obr. 46: IPFC - zapojení v síti [47]

Bus No	Mag. Of Voltages (p.u)		Angle of Voltage (Degrees)	
	Without IPFC	With IPFC	Without IPFC	With IPFC
1	1.06	1.06	0	0
2	1	1	-2.0565	-2.157
3	0.9940	0.9946	-4.7405	-4.9160
4	0.9912	0.9924	-5.0636	-3.8739
5	0.9773	0.9779	-5.8402	-5.4160

Obr. 47: Napěťový profil sítě [47]

Line No	Active Power Flow (MW)		Reactive Power Flow(MVAR)	
	Without IPFC	With IPFC	Without IPFC	With IPFC
1	89.200	88.053	77.405	77.742
2	41.845	43.030	16.687	16.156
3	24.449	26.274	-4.232	-5.053
4	27.689	29.866	-3.596	-4.213
5	54.579	49.457	2.509	3.368
6	19.480	22.371	2.881	1.184
7	6.662	11.640	3.572	2.273

Obr. 48: Tok výkonu v síti[47]

Další rozbor výkonnosti a simulace systému IPFC je možno nalézt v [48] a [49].

4 Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši aktivních výkonových filtrů a jejich způsobů řízení. Mezi aktivní výkonové filtry podrobené rozboru jsou 4 základní typy - paralelní, sériové, kombinované a hybridní. U těchto jednotlivých typů byl popsán princip činnosti včetně schématu zapojení a možnosti nasazení konkrétního typu filtru. Z pohledu způsobů řízení aktivních výkonových filtrů byl proveden rozbor hlavních, nejčastěji používaných přístupů: vektorové a prediktivní řízení, řízení s použitím Fourierovy transformace, řízení založené na P-Q teorii a řízení založené na metodě Fryze-Buchholz-Depenbrock.

Další část této práce byla zaměřena na rozbor prostředků pro řízení toku výkonu v síti, souhrnně označovaných jako FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Do skupiny FACTS však patří celá řada systémů, přičemž tato rešerše je zaměřena pouze na část rozsáhlé skupiny FACTS, a sice na moderní systémy založené na výkonových měničích. Mezi tento výběr spadají systémy UPFC, DPFC a IPFC, které jsou založeny na kombinaci sériové a paralelní kompenzace. Systém UPFC využívá obou způsobů kompenzace (tj. sériové i paralelní) a pracuje se spojením dvou výkonových měničů přes společný stejnosměrný meziobvod. Od konfigurace tohoto systému jsou odvozeny ostatní zařízení. UPFC může díky své konfiguraci jednak regulovat odběr jalového výkonu ze zdroje, provádět kompenzaci účinníku či pracovat jako aktivní filtr, ale také může pracovat jako kondicionér napětí a regulovat tok výkonu vedením. Systém DPFC se skládá z jednoho paralelního a několika sériových měničů. Sériový měnič využívá koncept tzv. D-FACTS (Distributed FACTS), který je založen na rozmístění více sériově připojených měničů podél vedení namísto jednoho měniče o velkém výkonu. Každý z měničů v systému DPFC je nezávislý a má svůj vlastní zdroj stejnosměrného napětí. Přenos výkonu mezi měniči není realizován přes společný stejnosměrný meziobvod, jako je tomu u systému UPFC, ale prostřednictvím přenosového vedení pomocí 3. harmonické složky. Systém IPFC na rozdíl od předchozích systémů pracuje na dvou nebo více vedeních. Nejjednodušší systém IPFC, který obsahuje dvojici napěťových měničů, je sériově připojen mezi 2 přenosová vedení. Pomocí IPFC lze provádět sériovou kompenzaci současně na dvou vedeních a realizovat přenos výkonu přes stejnosměrný meziobvod, který je společný pro dvojici výkonových měničů. IPFC díky tomuto společnému meziobvodu umožňuje přenos činného výkonu mezi jednotlivými linkami vedení. Zároveň je možné nezávisle kompenzovat jalový výkon v každé jednotlivé lince. Tímto zařízením tak lze velmi účinně ovlivňovat tok výkonu dvěma či více paralelními vedeními a regulovat zatížení jednotlivých linek. IPFC tím umožňuje výrazně zvýšit přenosovou kapacitu soustavy.

Literatura

Aktivní filtry

- [1] KŮS, Václav. *Výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 1996, 84 s. ISBN 80-708-2272-4.
- [2] ABB Sweden, *Flexible AC Transmission Systems*.: SVC and SVC Light projects Worldwide [online]. 2008. <<http://www.abb.cz/industries/us/9AAC30100023.aspx?country=CZ>>
- [3] AKAGI, H. *Modern active filters and traditional passive filters*. Bulletin of the Polish Academy of sciences, Technical sciences, vol.54, 2006, s. 255-269.
- [4] AKAGI, H. Active Harmonic Filters. *Proceedings of the IEEE* [online]. 2005, vol. 93, issue 12, s. 2128-2141 [cit. 2014-10-17]. DOI: 10.1109/JPROC.2005.859603.
- [5] *ATEE 2011 / 7th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, 12-14 May 2011: ATEE 2011 : Bucharest, Romania, 12-14 May 2011*. ISBN 9781457705076 ISSN 2068-7966.
- [6] LAMBURSKÝ, Jan. *Výkonové aktivní filtry*, Plzeň, 2012. Bakalářská práce. ZČU.
- [7] FUJITA, H. a H. AKAGI. Design strategy for the combined system of shunt passive and series active filters. *Conference Record of the 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, 1991, s. 898-903. DOI: 10.1109/IAS.1991.178344.
- [8] JACOBINA, C. B., A. C. OLIVEIRA, N. ROCHA, R. R. MATIAS, W. R. N. SANTOS a M. B. R. CORREA. Three-Phase Series Active Power Filter Without Isolation Transformer and Active DC Source. *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE, 2009, s. 1596-1601. DOI: 10.1109/APEC.2009.4802881.
- [9] FURTADO, P. C. S., M. C. B. P. RODRIGUES, H. A. C. BRAGA a P. G. BARBOSA. Two-phase, three-wire shunt active power filter using the single-phase P-Q theory. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*. IEEE, 2013, s. 1245-1250. DOI: 10.1109/CO-BEP.2013.6785275.
- [10] E. Clarke. *Circuit Analysis of A-C Power Systems, volume I Symmetrical and Related Components*. Wiley, 1943.
- [11] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, N.J., 2007.

- [12] WATANABE, E. H., H. AKAGI a M. AREDES. Instantaneous p-q power Theory for compensating nonsinusoidal systems. *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. IEEE, 2008, s. 1-10. DOI: 10.1109/ISNCC.2008.4627480.
- [13] M. T. Haque. Single-phase p-q theory. In *Power Electronics Specialists Conference*, volume 04, pages 1815–1820, 2002.
- [14] YANG, Chao, Qingxiu HUANG a Jiangman ZHOU. Research of hybrid active power filter based on FBD method detection. *2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC)*. IEEE, 2011, s. 4205-4208. DOI: 10.1109/AIMSEC.2011.6009931.
- [15] DEPENDBROCK, M. The FBD-Method, A Generally Applicable Tool For Analyzing Power Relations. *ICHPS V International Conference on Harmonics in Power Systems*. IEEE, 1992, s. 135-141. DOI: 10.1109/ICHPS.1992.559009.
- [16] MARAFAO, Fernando P., Helmo K. M. PAREDES a Luiz C. P. DA SIVA. Critical evaluation of FBD, PQ and CPT current decompositions for four-wire circuits. *2009 Brazilian Power Electronics Conference*. IEEE, 2009, s. 49-57. DOI: 10.1109/COBEP.2009.5347595.
- [17] FU ZHONGWEN, LI HAISHAN, HUANG WENLING a HAO RUIXIANG. A new current detecting method based on d-q transformation for active power filter. *Proceedings. International Conference on Power System Technology*. IEEE, 2002, s. 2265-2268. DOI: 10.1109/ICPST.2002.1047187.
- [18] SOZANSKI, K. a M. JARNUT. Three-phase active power filter using the sliding DFT control algorithm. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2005, 10 pp.-P.10. DOI: 10.1109/EPE.2005.219445.
- [19] CHANDRASEKARAN, S. a K RAGAVAN. Sliding DFT assisted instantaneous symmetrical components method for estimating reference current to Active Power Filter. *2012 IEEE 55th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*. IEEE, 2012, s. 1168-1171. DOI: 10.1109/MWSCAS.2012.6292233.
- [20] RODRIGUEZ, Jose a Patricio CORTES. *Predictive control of power converters and electrical drives*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley, c2012, xii, 230 p. ISBN 978-1119-96398-1.

- [21] WANG XIAO-GANG, XIE YUN-XIANG a SHUAI DING-XIN. Simplified model predictive control for a shunt active power filter. *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. IEEE, 2008, s. 3279-3283. DOI: 10.1109/PESC.2008.4592459.
- [22] ODAVIC, M., P. ZANCHETTA, M. SUMNER a Z. JAKOPOVIC. High Performance Predictive Current Control for Active Shunt Filters. *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference*. IEEE, 2006, s. 1677-1681. DOI: 10.1109/EPE-PEMC.2006.4778646.
- [23] VATANI, Mohsen, Morten HOVD a Marta MOLINAS. Finite Control Set Model Predictive Control of a shunt active power filter. *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2013, s. 2156-2161. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520594.
- [24] USMAN, Hamisu, Hashim HIZAM a Mohd Amran MOHD RADZI. Simulation of single-phase shunt active power filter with fuzzy logic controller for power quality improvement. *2013 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT)*. IEEE, 2013, s. 353-357. DOI: 10.1109/CEAT.2013.6775655.
- [25] CIRRINCIONE, M., M. PUCCI, G. VITALE a A. MIRAOU. Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, vol. 56, issue 8, s. 3128-3143. DOI: 10.1109/TIE.2009.2022070.
- [26] ADAM, G., Alina Georgiana STAN a G. LIVINT. An adaptive hysteresis band current control for three phase shunt active power filter U sing Fuzzy logic. *2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*. IEEE, 2012, s. 324-329. DOI: 10.1109/ICEPE.2012.6463910.
- [27] HADDAD, M., S. RAHMANI, F. FNAIECH a K. AL-HADDAD. A Lyapunov-based current control strategy of three phase Shunt Active Power Filter for harmonic elimination, power-factor correction, and load unbalance compensation. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2012, s. 3340-3345. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389362.
- [28] ANTCHIEV, Mihail Hr., Mariya P. PETKOVA, Hristo M. ANTCHIEV, Vanjo T. GOURGOULITSOV a Stanimir S. VALTCHEV. Study of a single-phase series active power filter with hysteresis control. *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. IEEE, 2011, s. 1-6. DOI: 10.1109/EPQU.2011.6128921.

- [29] ACUNA, Pablo F., Luis A. MORAN, Christian A. WEISHAUP a Juan W. DIXON. An active power filter implemented with multilevel single-phase NPC converters. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2011, s. 4367-4372. DOI: 10.1109/IECON.2011.6120027.
- [30] UCAR, Mehmet, Sule OZDEMIR a Engin OZDEMIR. A combined series-parallel active filter system implementation using generalized non-active power theory. *2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2010, s. 367-373. DOI: 10.1109/APEC.2010.5433646.
- [31] STRZELECKI, R., J. RUSINSKI a M. JARNUT. Properties, simulation and experimental investigation of the series-parallel active power filters. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*. IEEE, 2005, 9 pp.-P.9. DOI: 10.1109/EPE.2005.219617.
- [32] GONZATTI, R. B., S. C. FERREIRA, Carlos H. DA SILVA, L. E. BORGES DA SILVA, G. LAMBERT-TORRES a L. G. FERNANDEZ SILVA. A control strategy for hybrid series active power filter based on resonant compensators. *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2012, s. 34-39. DOI: 10.1109/ISIE.2012.6237055.
- [33] RAHMANI, S., Ab. HAMADI a K. AL-HADDAD. A new combination of Shunt Hybrid Power Filter and Thyristor Controlled Reactor for harmonics and reactive power compensation. *2009 IEEE Electrical Power*. IEEE, 2009, s. 1-6. DOI: 10.1109/EPEC.2009.5420375.

Řízení toku výkonu v síti

- [34] Yongan Deng, Reactive Power Compensation of Transmission Lines, Concordia University [online]. <http://users.encs.concordia.ca/~lalopes/Courses/IGEE401-F07/TL_Compensation.pdf>
- [35] KOREJČÍK, Michal. *Návrh transformátoru s regulací fáze pro laboratorní výuku*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno.
- [36] LIJIE, Ding, Liu YANG a Miao YIQUN. Comparison of High Capacity SVC and STATCOM in Real Power Grid. *2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. IEEE, 2010, s. 993-997. DOI: 10.1109/ICICTA.2010.586.

- [37] SOOD, V.K. Static synchronous series compensator model in EMTP. *IEEE CCECE2002. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37373)*. IEEE, 2002, s. 207-211. DOI: 10.1109/CCECE.2002.1015200.
- [38] GYUGYI, L. Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*. vol. 9, issue 2, s. 904-911. DOI: 10.1109/61.296273.
- [39] YE, Y., M. KAZERANI a V. QUINTANA. Current-source converter based SSSC: modeling and control. *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*. IEEE, 2001, s. 949-954. DOI: 10.1109/PESS.2001.970183.
- [40] Grünbaum R., Noroozian M., B. Thorvaldsson. FACTS - powerful systems for flexible power transmission, ABB Review 5/1999, s.4-17.
- [41] SAYED, Mahmoud A. a Takaharu TAKESHITA. Line Loss Minimization in Isolated Substations and Multiple Loop Distribution Systems Using the UPFC. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2014, vol. 29, issue 11, s. 5813-5822. DOI: 10.1109/TPEL.2014.2301833.
- [42] KANNAN, S., S. JAYARAM a M.M.A. SALAMA. Real and Reactive Power Coordination for a Unified Power Flow Controller. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, vol. 19, issue 3, s. 1454-1461. DOI: 10.1109/TPWRS.2004.831690.
- [43] SHEN ZHANG, RUNRUI GUO a KANG LI. Modeling and design of matrix converter based unified power flow controller with implementation of complex vector synchronous frame PI current regulators. *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. IEEE, 2013, s. 1619-1623. DOI: 10.1109/ICEMS.2013.6713314.
- [44] YUAN, Zhihui, Sjoerd W. H. de HAAN, Jan Braham FERREIRA a Dalibor CVORIC. A FACTS Device: Distributed Power-Flow Controller (DPFC). *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010, vol. 25, issue 10, s. 2564-2572. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2050494.
- [45] JAMSHIDI, Ahmad, S. MASOUD BARAKATI a MOHAMMAD MORADI GHAHDERI-JANI. Power quality improvement and mitigation case study using distributed power flow controller. *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2012, s. 464-468. DOI: 10.1109/ISIE.2012.6237131.
- [46] ZHANG, Jun a Akihiko YOKOYAMA. Optimal Power Flow Control for Congestion Management by Interline Power Flow Controller (IPFC). *2006 International Conference on Power System Technology*. IEEE, 2006, s. 1-6. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321421.

- [47] SREEJITH, S., S.P. SIMON a M.P. SELVAN. Investigations on power flow solutions using Interline Power Flow Controller (IPFC). *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011)*. IET, 2011, s. 63-68. DOI: 10.1049/cp.2011.0336.
- [48] MURUGANANDHAM, J. a R. GNANADASS. Performance analysis of Interline power flow Controller for practical power system. *2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*. IEEE, 2012, s. 1-8. DOI: 10.1109/SCE-ECS.2012.6184781.
- [49] BABU, A. V. Naresh a S. SIVANAGARAJU. Mathematical modelling, analysis and effects of interline power flow controller (IPFC) parameters in power flow studies. *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*. IEEE, 2011, s. 1-7. DOI: 10.1109/IICPE.2011.5728060.