

Prevádzka elektrizačnej sústavy s využitím FACTS zariadení

2007

OBSAH

Úvod.....	2
1. Aktuálne problémy riadenia prevádzky elektrizačnej sústavy.....	3
1.1 Kvalita elektrickej energie	3
1.2 Stabilita prevádzky elektrizačnej sústavy	3
1.3 Hospodárnosť prevádzky elektrizačnej sústavy	4
2. Charakteristika FACTS zariadení	5
2.1 Základné kategórie FACTS.....	5
2.2 Stručný popis FACTS regulátorov	6
2.3 Možnosti použitia FACTS regulátorov	10
3. Princíp použitia FACTS regulátorov na riešenie konkrétnych problémov riadenia ES.....	14
3.1 Kvalita elektrickej energie	14
3.2 Stabilita prevádzky elektrizačnej sústavy	16
3.3 Hospodárnosť prevádzky elektrizačnej sústavy	18
Zoznam použitej literatúry	22

Úvod

Na prevádzkovateľa prenosovej sústavy a prevádzkovateľov distribučných sústav v Slovenskej republike sú kladené povinnosti, ktorých hlavným cieľom je zabezpečiť spoľahlivé, bezpečné a hospodárne zásobovanie všetkých spotrebiteľov kvalitnou elektrickou energiou. V zahraničí sú čoraz častejšie pri riešení problémov spojených s riadením prevádzky prenosových i distribučných sústav aplikované špecializované systémy na báze výkonovej elektroniky známe pod skratkou FACTS.

FACTS zariadenia poskytujú prevádzkovateľom elektrizačných sústav nasledovné výhody a možnosti [3, 5]:

1. Zvyšovanie prenosovej schopnosti existujúcich vedení až k ich maximu bez potreby pridávania nových prenosových prvkov.
2. Reguláciu toku výkonov v sústave, redukcii kruhových tokov tečúcich vedeniami.
3. Zlepšenie spoľahlivosti prevádzky sústavy prostredníctvom zvýšenia limitov statickej a dynamickej stability, tlmenia elektromechanických oscilácií strojov a obmedzenia skratových prúdov a prepätí.
4. Spoľahlivé prepojenie susedných sústav a tým zníženie potrebnej výroby energie na oboch stranách.
5. Redukciu potreby veľkých tlmiviek a kondenzátorov a zníženie nárokov na veľkosť priestoru, ktorý vyžadovali v rozvodniach.
6. Kompaktnosť a modulárnosť FACTS systémov umožňuje ich jednoduché umiestnenie a rozširovanie podľa potreby.

1. Aktuálne problémy riadenia prevádzky elektrizačnej sústavy

1.1 Kvalita elektrickej energie

Každý problém, ktorý je spätý s odchýlkou napätia, prúdu alebo frekvencie od menovitej hodnoty a spôsobuje poruchu alebo chybnú činnosť zariadenia je problémom kvality elektrickej energie [9].

K problému, súvisiacim s kvalitou elektrickej energie patrí hlavne:

1. Znečisťovanie prenosových, distribučných a rozvodných sietí vyššími harmonickými, generovanými nelineárnymi záťažami, používajúcimi výkonové polovodičové systémy.
2. Blikanie, ktoré je spôsobené kolísaním efektívnej hodnoty napätia.
3. Medziharmonické, ktoré sú generované napríklad cyklokonvertormi, či tyristorovými meničmi veľkých výkonov.
4. Nesymetria, spôsobená na jednej strane veľkými jednofázovými odbermi a na druhej strane väčším množstvom malých jednofázových odberov.
5. Zhoršený účinník odberu základnej harmonickej prúdu.
6. Prerušenia, poklesy napätia a prepätia.

1.2 Stabilita prevádzky elektrizačnej sústavy

Pod pojem stabilita elektrizačnej sústavy sú zaradované prechodné javy súvisiace so zmenami záťažového uhla generátora, so zmenami frekvencie a napätia [7].

Stabilita elektrizačnej sústavy môže byť všeobecne definovaná ako schopnosť elektrizačnej sústavy zotrvať v stave prevádzkovej rovnováhy pri ustálených prevádzkových podmienkach a schopnosť znovu získať akceptovateľný stav rovnováhy po poruche. [6]

Počas normálnej prevádzky je elektrizačná sústava v stave blízkom rovnovážnemu, iba s malými odchýlkami od ustáleného stavu, ktoré sú zapríčinené neustálymi zmenami záťaže. V prípade poruchy je dôležité čo najrýchlejšie zareagovať a vhodnými zásahmi (rozdelením výkonov, budením) predchádzať havarijným stavom. [8]

Dôvodov, prečo je potrebné venovať zvýšenú pozornosť stabilite elektrizačných sústav je niekoľko:

1. Klasické riešenia rozvoja sietí, založené na posilňovaní existujúcich a budovaní nových vedení, vzhľadom na narastajúce problémy so získavaním nových koridorov, ako aj v súvislosti so zohľadnením environmentálnych požiadaviek sa javia ako nedostatočné a zdĺhavé.
2. Najväčšia dôležitosť sa prikladá a bude prikladať kvalite dodávky elektrickej energie.
3. Otváranie trhu s elektrinou je sprevádzané nárastom množstva medzištátnych výmen elektriny so zväčšujúcim sa objemom prenášanej energie a nárastom tranzitov elektriny na veľké vzdialenosti za účasti viacerých elektrizačných sústav.
4. Jednou zo zásadných zmien v rámci liberalizácie trhu s elektrickou energiou je zavedenie koncepcie „prístupu tretej strany“, ktorá umožňuje odberateľom zvoliť si svojho dodávateľa energie. Zvyšuje sa tým konkurencia medzi výrobcami a prenosové

vedenia budú stále častejšie prevádzkované v podmienkach, ktoré neboli zohľadňované v čase ich plánovania.

V prípade prevádzky za týchto podmienok v určitých stavoch sa začínajú objavovať úzke profily v sieťach, ktoré sa môžu stať aj obmedzujúcim faktorom pre uvažované obchodné výmeny. Tieto situácie potom následne môžu viesť k výpadkom a prerušeniu zásobovania v určitých oblastiach.

Výsledkom týchto zmien bude z technického hľadiska fakt, že elektrizačná sústava bude prevádzkovaná bližšie pri svojich fyzikálnych limitoch, pričom tieto sú medzou stability. Preto sa často hľadajú spôsoby, ktoré by dokázali aspoň regionálne zvrátiť nepriaznivé vplyvy uvedených záporných trendov a procesov na prevádzku elektrizačných sústav. Jeden zo spôsobov je rozšíriť možnosti rýchleho regulovania vybraných veličín v sústave s využitím FACTS zariadení.

1.3 Hospodárnosť prevádzky elektrizačnej sústavy

Hospodárnosť (optimalizácia) prevádzky elektrizačnej sústavy je dlhodobá vždy aktuálna a organizačne náročná úloha, ktorej riešenie prebieha v sústavách od počiatku dispečerského riadenia. Nárast medzištátnych výmen a tranzitov elektriny si vyžaduje efektívnejšie využívanie prenosovej schopnosti prenosových prvkov a medzištátnych profilov. Z toho dôvodu sa hľadajú spôsoby, ktoré dokážu prostredníctvom riadenia vybraných veličín v sústave zvýšiť využitie súčasných prenosových systémov a optimalizovať toky prenášaných výkonov v elektrizačných sústavách.

2. Charakteristika FACTS zariadení

Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) sú organizáciou IEEE (the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) definované ako striedavé prenosové systémy na báze výkonovej elektroniky a iných statických regulátorov (nie na báze výkonovej elektroniky) na zlepšenie regulovateľnosti a zvýšenie výkonovej prenosovej schopnosti [5].

FACTS regulátor je definovaný ako systém na báze výkonovej elektroniky a iné statické zariadenie, ktoré poskytuje reguláciu jedného alebo viacerých parametrov striedavej prenosovej sústavy [5]. Medzi regulovateľné parametre patrí napr. napätie, prúd, impedancia, fázový uhol.

2.1 Základné kategórie FACTS

FACTS regulátory je možné vo všeobecnosti rozdeliť do 4 kategórií [5]:

1. Paralelné regulátory
2. Sériové regulátory
3. Kombinované sériovo-sériové regulátory
4. Kombinované sériovo-paralelné regulátory

Paralelným regulátorom, môže byť regulovateľná impedancia (napr. tlmivka alebo kondenzátor), regulovateľný zdroj na báze výkonovej elektroniky s frekvenciou podľa potreby alebo ich kombinácia. V princípe, všetky paralelné regulátory injektujú prúd do sústavy v mieste ich pripojenia.

Sériovým regulátorom, tak ako v prípade paralelného regulátora, môže byť regulovateľná impedancia, regulovateľný zdroj alebo ich kombinácia. V princípe, všetky sériové regulátory predstavujú zdroj napätia zapojený do série s vedením.

Kombinovaný sériovo-sériový regulátor môže byť v dvoch rôznych vyhotoveniach.

Prvé vyhotovenie pozostáva z kombinácie koordinovane riadených oddelených sériových regulátorov zapojených do vedení. Druhým prípadom je unifikovaný regulátor, v ktorom sériové regulátory poskytujú nezávislú sériovú kompenzáciu jalového výkonu v každom vedení a taktiež prenos činného výkonu medzi vedeniami cez jednosmernú linku spájajúcu regulátory. Takéto vyhotovenie, v anglickom jazyku nazývané ako Interline Power Flow Controller, umožňuje regulovať činný aj jalový výkon tečúci po vedeniach a tým maximalizovať využitie prenosovej schopnosti vedení.

Kombinovaný sériovo-paralelný regulátor môže byť tiež v dvoch vyhotoveniach.

Prvé je kombináciou koordinovane riadených oddelených sériových a paralelných regulátorov. Druhé vyhotovenie, nazývané ako Unified Power Flow Controller (unifikovaný regulátor toku výkonu), pozostáva z kombinácie sériových a paralelných regulátorov prepojených jednosmerným vedením. Výhodou druhého vyhotovenia je, že okrem sériovej kompenzácie a injektovania prúdu do sústavy umožňuje aj výmenu činného výkonu medzi sériovými a paralelnými regulátormi.

2.2 Stručný popis FACTS regulátorov

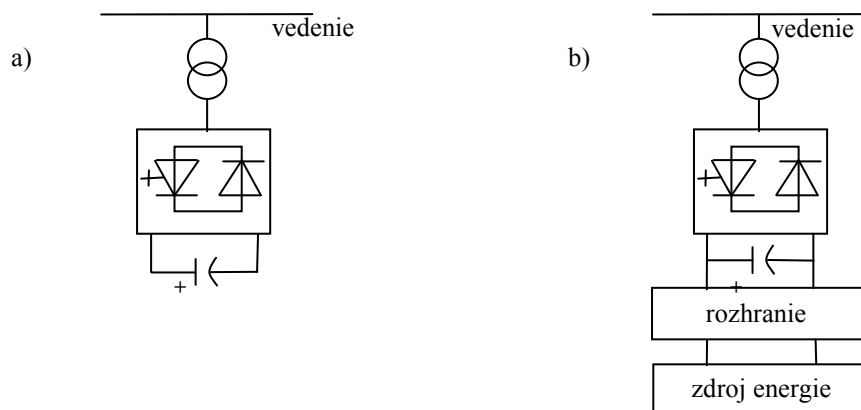
Paralelné regulátory

Static Synchronous Compensator (STATCOM) – Statický synchronný kompenzátor

Statický synchronný generátor prevádzkovaný ako paralelne zapojený statický kompenzátor jalového výkonu, ktorého kapacitný a induktívny prúd môže byť regulovaný nezávisle od striedavého napätia v sústave [5]. Umožňuje rýchlo a presne reagovať na pokles i nárast napätia v sústave [1]. Svojou funkciou sa podobá rotačnému synchronnému kompenzátoru, výhodou je však väčšia rýchlosť odozvy, presnosť regulácie, symetrický rozsah $\pm Q$ a nezvyšuje skratový prúd v ES.

Static Synchronous Generator (SSG) – Statický synchronný generátor

Kombinácia statického synchronného kompenzátora a zdroja energie. Umožňuje regulovať výmenu jalového aj činného výkonu medzi vhodným zdrojom a sústavou. Funkciu zdroja energie v statickom synchronnom generátore môže plniť napr. akumulátor, supravodivý magnet alebo kondenzátorová batéria. [5]



Obr. 1: Statický synchronný kompenzátor: a) bez prídavného zdroja energie, b) s prídavným zdrojom energie

Static Var Compensator (SVC) – Statický kompenzátor jalového výkonu

Paralelne zapojený statický zdroj alebo spotrebič jalového výkonu, ktorého funkciou je regulovať určité parametre v sústave (najčastejšie napätie v uzle pripojenia). Je to univerzálny názov pre tyristorom riadenú alebo spínanú tlmivku, kondenzátor alebo ich kombináciu.

Statické kompenzátory jalového výkonu boli skonštruované v mnohých rozličných vyhotoveniach, väčšina z nich pozostáva z nasledujúcich elementov [3]:

- Thyristor Controlled Reactor (TCR) – tyristorom riadená tlmivka

Jalový výkon je možné spojitou meniť riadením prúdu cez tlmivku. Deformácia prúdu tečúceho zariadením TCR spôsobená spínaním tyristorov vedie k vzniku vyšších harmonických v tomto zariadení. Násobky základnej harmonickej závisia od spôsobu zapojenia tyristorov (trojuholník, hviezda), od ich počtu (napr. 6-pulzný, 12-pulzný TCR) a od spôsobu prevádzky TCR. Na ich elimináciu sa používajú filtre vyšších harmonických paralelne prevádzkované so zariadením TCR. [6]

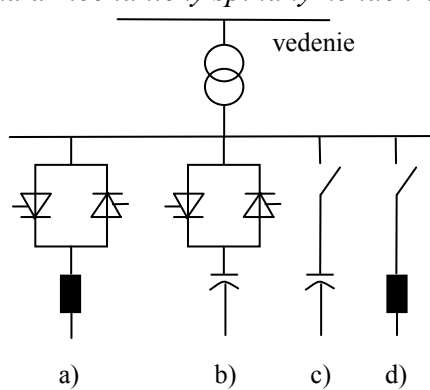
- *Thyristor Switched Reactor (TSR) – tyristorom spínaná tlmivka*

V tomto prípade je možné jalový výkon meniť spínaním tlmivky. TSR obyčajne pozostáva z niekoľkých paralelne zapojených tlmiviek, ktoré sú podľa požiadavky pripájané alebo odpájané od sústavy.

- *Thyristor Switched Capacitor (TSC) - tyristorom spínaný kondenzátor*

Jalový výkon je možné meniť spínaním kondenzátora. TSC obyčajne pozostáva z niekoľkých paralelne zapojených kondenzátorov, ktoré sú podľa požiadavky pripájané alebo odpájané od sústavy. Do série k zariadeniu sa pripája aj tlmivka k obmedzeniu spínacích prechodných dejov, tlmeniu nárazových prúdov a k zabráneniu rezonancie s induktívnou reaktanciou siete. Vhodným riadením TSC je možné dosiahnuť odstránenie nepriaznivých prechodných dejov spôsobených spínaním. [6]

- *Mechanical Switched Reactor a Mechanical Switched Capacitor (MSR a MSC) mechanicky spínaná tlmivka a mechanicky spínaný kondenzátor*



Obr. 2: Statický kompenzátor jalového výkonu: a) tyristorom riadená tlmivka a tyristorom spínaná tlmivka, b) tyristorom spínaný kondenzátor, c) mechanicky spínaný kondenzátor, d) mechanicky spínaná tlmivka

Thyristor Controlled Braking Resistor (TCBR) – Tyristorovo riadený brzdný rezistor

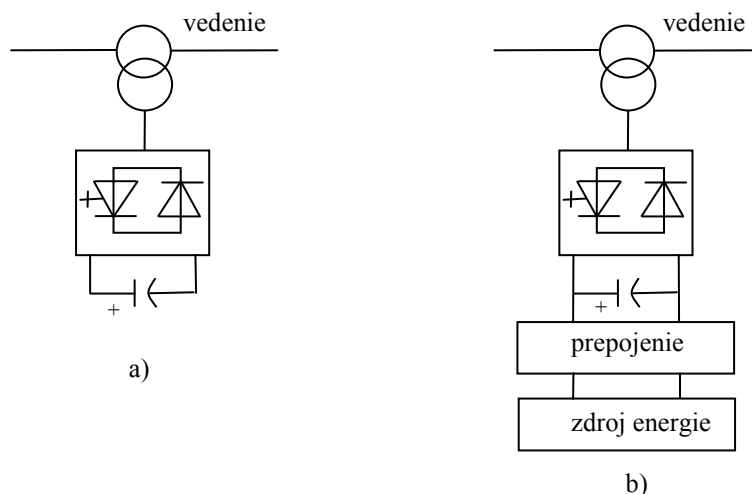
Tyristorovo spínaný rezistor (obyčajne lineárny). Umožňuje stabilizovať energetickú sústavu a znížiť akceleračný výkon generátora počas poruchy. Najlepšie umiestnenie TCBR je blízko generátora, ktorý vyžaduje zníženie akceleračného výkonu počas prechodných nestabilných podmienok. [5]

Sériové regulátory

Static Synchronous Series Compensator (SSSC) – Statický synchronný sériový kompenzátor

Statický synchronný generátor prevádzkovaný ako sériový kompenzátor, ktorého výstupné napätie môže byť regulované nezávisle od prúdu v sústave. Umožňuje riadiť tok výkonu oboma smermi a tmiť oscilácie. Je porovnateľný s riadeným sériovým kondenzátorom, ale je výrazne výkonnejší a presnejší [3].

Regulátor SSSC je spolu s regulátorom STATCOM jedným z najdôležitejších FACTS regulátorov [5].



Obr. 3: Statický synchronný sériový kompenzátor: a) bez prídavného zdroja energie, b) s prídavným zdrojom energie

Interline Power Flow Controller (IPFC)

Kombinácia dvoch alebo viacerých statických synchronných sériových kompenzátorov, ktoré sú navzájom prepojené jednosmerným vedením za účelom obojsmernej výmeny činného výkonu medzi kompenzátorami. Kompenzátory sú riadené za účelom regulácie toku činného výkonu vedeniami a udržiavania požadovaného toku jalového výkonu medzi vedeniami [5].

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) – Tyristorovo riadený sériový kondenzátor

Kompenzátor pozostávajúci z tyristorom riadenej tlmivky (TCR), ktorá je paralelne pripojená ku kondenzátoru. Umožňuje plynulo meniť svojim pôsobením (zmenou stupňa kompenzácie) impedanciu prenosovej cesty. Poskytuje plynulú sériovú kompenzáciu, ktorej výsledkom je regulácia napätia v ustálenom stave a zabránenie výpadku napätia. Je alternatívou voči statickému synchronnému sériovému kompenzátoru [5].

Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC) – Tyristorovo spínaný sériový kondenzátor

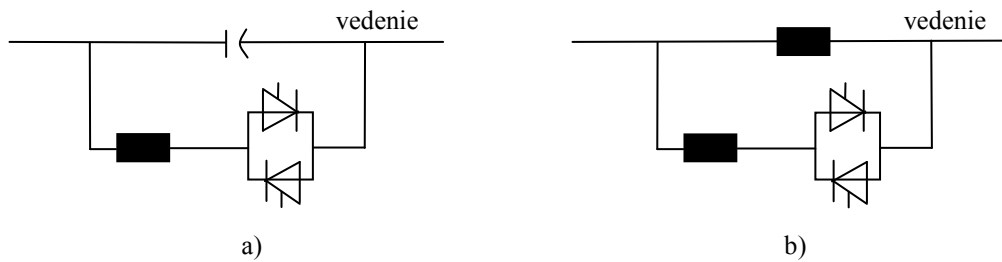
Kompenzátor pozostávajúci z tyristorom riadenej tlmivky (TCR), ktorá je paralelne pripojená ku kondenzátoru. Poskytuje diskkrétne riadenie sériovej impedancie vedenia. Často TSSC usporiadanie obsahuje viac kondenzátorov, ku ktorým sú paralelne pripojené tyristory v antiparalelnom usporiadaní. Stupeň kompenzácie je v tom prípade regulovaný diskrétnym spôsobom, zvyšovaním, resp. znižovaním počtu pripojených kondenzátorov k sústave [5].

Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR) – Tyristorovo riadená sériová tlmivka

Kompenzátor pozostávajúci z tlmivky ku ktorej je paralelne pripojená tyristorom riadená tlmivka (TCR). Poskytuje plynulé riadenie sériovej impedancie vedenia.

Thyristor Switched Series Reactor (TSSR) – Tyristorovo spínaná sériová tlmivka

Kompenzátor pozostávajúci z tlmivky ku ktorej je paralelne pripojená tyristorom spínaná tlmivka. Poskytuje diskkrétne riadenie sériovej impedancie vedenia.



Obr. 4: a) tyristorovo riadený sériový kondenzátor a tyristorovo spínaný sériový kondenzátor, b) tyristorovo riadená sériová tlmivka a tyristorovo spínaná sériová tlmivka

Kombinované sériovo-paralelné regulátory

Unified Power Flow Controller (UPFC) – Unifikovaný regulátor toku výkonu

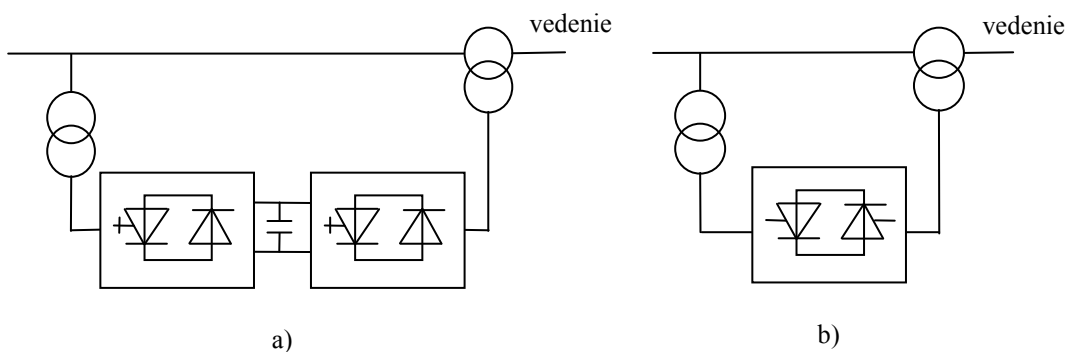
Kombinácia statického synchronného kompenzátora (STATCOM) a statického sériového synchronného kompenzátora (SSSC), ktoré sú navzájom prepojené jednosmernou linkou za účelom obojsmerného prenosu činného výkonu medzi kompenzátormi. Poskytuje reguláciu napätia, impedancie a fázového uhla, a to v reálnom čase a v ľubovoľnej kombinácii. Umožňuje nezávisle na sebe riadiť tok činného výkonu a jalového výkonu po vedení.

Základnými funkciami UPFC sú [1]:

- regulácia napätia,
- sériová kapacitná kompenzácia,
- regulácia fázového uhla (oboma smermi) bez zmeny veľkosti napätia,
- regulácia toku výkonov ako výslednica spoločného pôsobenia funkcií a) b) c).

Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (TCPST) – Tyristorovo riadený transformátor s uhlovou reguláciou

TCPST je transformátor s uhlovou reguláciou riadený tyristormi. Pracuje principiálne ako pozdĺžny a priečny regulačný transformátor, avšak mechanický systém je nahradený vhodným tyristorovo riadeným systémom spínania. Toto riešenie umožňuje skokové alebo plynulé obojsmerné riadenie veľkosti napätia [1].



Obr. 5: a) unifikovaný regulátor toku výkonu, b) tyristorovo riadený transformátor s uhlovou reguláciou

Interphase Power Controller (IPC) – Medzifázový výkonový regulátor

Regulátor činného a jalového toku výkonu. Nevyhnutnými súčasťami IPC sú paralelné vetvy s transformátorom s uhlovou reguláciou a s pasívnymi elementmi: tlmivkou a kondenzátorom, ktoré sú pripojené do každej fázy. Činný a jalový tok výkonu môže byť

riadený nezávisle mechanickou alebo elektronickou reguláciou fázového posunu a/alebo impedancií vo vetvách.

Hlavným účelom IPC je udržiavať konštantnú hodnotu toku činného výkonu medzi dvoma uzlami v sústave. [10]

Ďalšie regulátory

Thyristor Controlled Voltage Limiter (TCVL) – Tyristorovo riadený napät'ový obmedzovač

Tyristorovo spínaný metal-oxid varistor (MOV) použitý k obmedzeniu napätia na jeho svorkách počas prechodných dejov. Tyristorový spínač môže byť spojený so zvodičom sériovo, alebo môže byť spojený paralelne k časti zvodiča. [5]

Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR) – Tyristorovo riadený regulátor napätia

Tyristorovo riadený transformátor, ktorý poskytuje plynulú reguláciu napätia. Môže byť v dvoch vyhotoveniach [5]:

Regulačný transformátor s tyristorovo riadeným prepínačom odbočiek.

Tyristorovo riadený napät'ový menič, ktorý vkladá do vedenia regulovateľné striedavé napätie s rovnakou fázou.

Takýto relatívne lacný regulátor môže byť efektívnym prostriedkom v regulácii toku jalového výkonu v sústave.

Active Filter (AF) – Aktívny filter

Základné princípy aktívnych filtrov sú známe už niekoľko desaťročí, avšak ich úspešná realizácia nebola možná bez rýchlych výkonových polovodičových súčiastok, ktoré sa začali používať v poslednom období. Jedná sa predovšetkým o IGBT tranzistory, pomocou ktorých je možné realizovať filtračné zariadenia s výkonom rádovo jednotky MVA. [3]

Aktívne filtre je možné uvažovať ako paralelne alebo sériovo zapojené generátory riadené vhodným regulačným systémom tak, aby aj v dynamických stavoch bola zaistená požadovaná kompenzácia nevhodných harmonických zložiek.

Okrem filtrácie prúdu vyšších harmonických môže aktívny filter [3]:

1. Zabezpečiť rýchlu kompenzáciu účinníka generovaním jalovej zložky základnej harmonickej prúdu.
2. Upravovať nesymetriu odberu.
3. Stabilizovať amplitúdu napätia generovaním zhodných zložiek napätia v protifáze.

Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Zariadenia DVR zvyšujú kvalitu elektrickej energie u spotrebiteľa udržiavaním hodnoty napätia v dovoľených medziach korekciou nedovoľených poklesov a vzrastov napätia v elektrizačnej sústave [11]. Môžu byť vyhotovené pre rôzne napät'ové úrovne, ale najvhodnejšie a najčastejšie sú vn a vvn aplikácie.

2.3 Možnosti použitia FACTS regulátorov

Napätie, prúd, impedancia, činný výkon a jalový výkon sú navzájom ovplyvňované veličiny, z toho dôvodu každý regulátor je multifunkčným zariadením, ktoré je možné použiť v podmienkach regulácie napätia, toku výkonov, zlepšenia stability sústavy a pod.

V nasledujúcej tabuľke sú podľa literatúry [5] uvedené oblasti použitia jednotlivých typov FACTS regulátorov.

Tab. 1: Oblasti použitia FACTS regulátorov

FACTS regulátor	oblasť použitia
STATCOM bez prídavného zdroja energie	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, napät'ová stabilita
STATCOM s prídavným zdrojom energie	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita
SVC, TCR, TSC, TSR	regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita
SSSC bez prídavného zdroja energie	regulácia prúdu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita, obmedzenie skratových prúdov
SSSC s prídavným zdrojom energie	regulácia prúdu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita
TCSC, TSSC	regulácia prúdu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita, obmedzenie skratových prúdov
TCSR, TSSR	regulácia prúdu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita, obmedzenie skratových prúdov
TCPST	regulácia činného výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita
UPFC	regulácia činného a jalového výkonu, regulácia napätia, kompenzácia jalového výkonu, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita, obmedzenie skratových prúdov
TCVL	napät'ové obmedzenie počas prechodných a dynamických dejov
TCVR	regulácia jalového výkonu, regulácia napätia, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita
IPFC	regulácia jalového výkonu, regulácia napätia, tlmenie oscilácií, statická a dynamická stabilita, napät'ová stabilita

Použite FACTS zariadení počas ustáleného chodu

Tab. 2: Použitie FACTS počas ustáleného chodu

otázka	problém	opravná činnosť	konvenčné riešenie	FACTS
napät'ové limity	pokles napätia pri vyššom zaťažení	dodávka jalového výkonu	pribudenie generátora, paralelné kondenzátory, sériové kondenzátory	SVC, TCSC, STATCOM
	vysoké napätie pri nízkom zaťažení	odpojenie dodávky jalového výkonu	vypnutie vedenia a/alebo paralelného kondenzátora	SVC, TCSC, STATCOM
		absorbovanie jalového výkonu	vypnutie paralelného kondenzátora alebo pripojenie tlmivky	SVC, STATCOM
	vysoké napätie následkom výpadku	absorbovanie jalového výkonu	pripojenie tlmivky	SVC, STATCOM
použitie ochrán		zapôsobenie zvodíča prepätia	SVC	

	nízke napätie následkom výpadku	dodávka jalového výkonu	pripojenie tlmivky	SVC, STATCOM
		zabránenie preťaženiu	sériová tlmivka, transformátor s uhlovou reguláciou	TCPST, TCSC
	nízke napätie a preťaženie	dodávka jalového výkonu a zamedzenie preťaženiu	kombinácia dvoch alebo viacerých zariadení	TCSC, UPFC, STATCOM, SVC
tepelné limity	preťaženie vedení alebo transformátorov	redukcia preťaženia	pripojenie vedenia alebo transformátora	TCSC, UPFC, TCPST
			pripojenie sériovej tlmivky	SVC, TCSC
	vypnutie paralelných liniek	obmedzenie preťaženia vedení	pripojenie sériovej tlmivky, kondenzátora	UPFC, TCSC
kruhovú toky	zdieľanie zaťaženia paralelnými linkami	upravenie sériovej reaktancie	pripojenie sériovej tlmivky, kondenzátora	UPFC, TCSC
		upravenie fázového uhla	použitie transformátora s uhlovou reguláciou	TCPST, UPFC
	nechcená zmena smeru toku výkonov	upravenie fázového uhla	použitie transformátora s uhlovou reguláciou	TCPST, UPFC
úroveň skratových prúdov	prekročenie poruchového prúdu výkonového vypínača	obmedzenie skratových prúdov	pripojenie sériovej tlmivky, výmena výkonového vypínača	UPFC, TCSC
		výmena výkonového vypínača	výmena výkonového vypínača	–
		zmena zapojenia siete	rozdelenie prípojnic	–
subsynchronná rezonancia	potencionálne poškodenie turbíny alebo generátora	zmiernenie oscilácií	sériová kompenzácia	TCSC

Použitie FACTS zariadení počas prechodných dejov

Tab. 3: Použitie FACTS počas prechodných dejov

otázka	typ elektrizačnej sústavy	opravná činnosť	konvenčné riešenie	FACTS
dynamická stabilita	A, B, D	zvýšiť krútiaci moment	rýchle budenie, sériový kondenzátor	TCSC, TSSC, UPFC
	A, D	absorbovanie kinetickej energie	brzdny rezistor, rýchla regulácia turbíny	TCBR
	B, C, D	dynamická regulácia toku výkonu	HVDC	TCPST, UPFC, TCSC
tlmenie oscilácií	A	tlmenie 1 Hz oscilácií	budič, stabilizačná spätná väzba - power system stabilizer (PSS)	SVC, TCSC, STATCOM
	B, D	tlmenie oscilácií s nižšou frekvenciou	stabilizačná spätná väzba - power system stabilizer (PSS)	SVC, TCPST, UPFC, TCSC, STATCOM

regulácia napätia po prechodnom jave	A, B, D	dynamická regulácia napätia	–	SVC, STATCOM, UPFC
		dynamická regulácia toku výkonu	–	SVC, UPFC, TCPST
		dynamická regulácia napätia a toku výkonu	–	SVC, UPFC, TCSC
	A, B, C, D	zníženie dopadu udalosti	paralelné linky	SVC, TCSC, STATCOM, UPFC
napät'ová stabilita	B, C, D	kompENZAČNÁ podpora	paralelný kondenzátor, tlmivka	SVC, STATCOM, UPFC
		regulácia napätia v sieti	zmena stupňa odbočky transformátora	UPFC, TCSC, STATCOM
		regulácia výroby	rýchle budenie	–
		regulácia spotreby	programy DSM, vypínanie a znížovanie spotreby pri nízkom napätí (samoregulačný efekt zaťaženia)	–

- A – vzdialená výroba – radiálna sieť
 B – prepojené regulačné oblasti
 C – silne zahustená sieť (napr. západná Európa)
 D – slabo zahustená sieť (napr. Austrália)

Pozn.: Tabuľky 2 a 3 boli spracované podľa literatúry [4].

3. Princíp použitia FACTS regulátorov na riešenie konkrétnych problémov riadenia ES

3.1 Kvalita elektrickej energie

Elimináciu problémov súvisiacich s kvalitou elektrickej energie (vrátane energetického rušenia spôsobeného polovodičovými zariadeniami ako regulované pohony, meniče frekvencie a pod.) je možné realizovať aktívnymi filtrami.

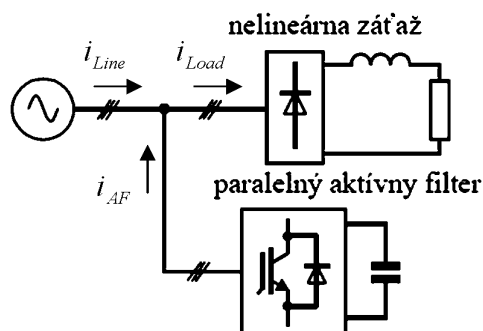
Základné delenie aktívnych filtrov podľa systémovej konfigurácie:

- a) paralelné aktívne filtre,
- b) sériové aktívne filtre.

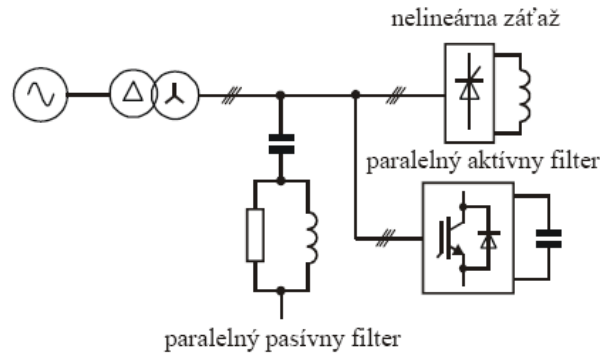
a) **Paralelný aktívny filter** (Obr. 6) je tvorený generátorom prúdu, ktorý je pripojený paralelne k záťaži. Filter meria prúdy vyšších harmonických odoberané nelineárnou záťažou ($i_{Load,harmonics}$) a sám generuje opäť prúdy vyšších harmonických (i_{AF}), avšak v protifáze, ako boli namerané jednotlivé harmonické (Obr. 8). To znamená, že zatiaľ čo nelineárny spotrebič odoberá prúd so značne deformovaným priebehom (i_{Load}), zo zdroja sa odoberá prúd s takmer ideálnym priebehom len so základnou frekvenciou ($i_{Line} = i_{Load,fund}$). Následne je upravená deformácia napätia spôsobená záťažou [2, 3].

Paralelný aktívny filter je tiež schopný dodávať jalový prúd základnej harmonickej, čiže kompenzovať účinník a tiež upravovať nesymetrický odber na symetrický dodaním spätnej zložky prúdu.

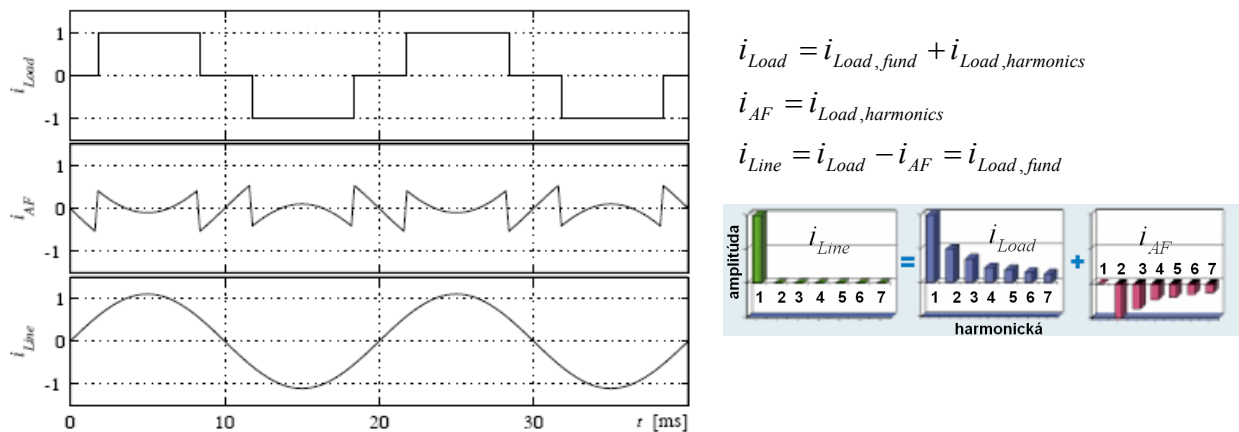
Výkonová časť filtra pozostáva z mostíkového zapojenia polovodičových spínačov, obyčajne s IGBT tranzistormi. Vhodným riadením spínania jednotlivých prvkov je možné dosiahnuť požadovaný tvar prúdu. Tento prúd však obsahuje veľké množstvo harmonických v oblasti spínacej frekvencie. Preto je nutné zaradiť medzi vývody aktívneho filtra a napájajúcu sieť pasívny filter. Jedno z možných riešení umiestnenia pasívneho filtra je na obr. 7 [3].



Obr. 6: Zapojenie paralelného aktívneho filtra



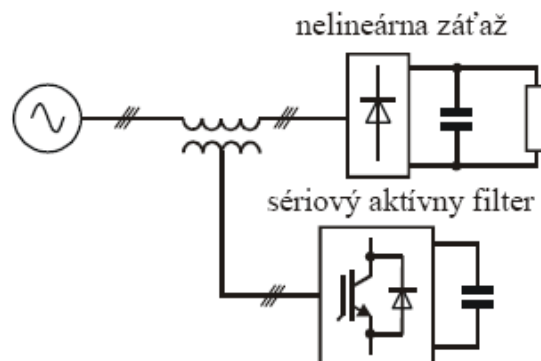
Obr. 7: Umiestnenie pasívneho filtra spínacích frekvencií



Obr. 8: Princíp aktívneho filtra v časovom a frekvenčnom spektre

b) **Sériový aktívny filter** (Obr. 9) má schopnosť udržiavať amplitúdu napätia, kompenzovať poklesy napätia a jeho špičky, odstraňovať harmonické napätia, zaisťovať symetrické rozloženie napätia.

Koncepcia sériového aktívneho filtra je založená na princípe izolácie harmonických pomocou riadeného výstupného napätia filtra. Inými slovami, sériový aktívny filter predstavuje veľkú impedanciu pre harmonický prúd a tak blokuje tok prúdu harmonických zložiek zo záťaže do striedavého zdroja a zo striedavého zdroja do záťaže.



Obr. 9: Zapojenie sériového aktívneho filtra

Sériový aktívny filter je zapojený do siete cez prevodový transformátor. Filter je schopný dodávať energiu pri výpadku napájacieho napätia, samozrejme len v prípade, že je napájaný nezávislým zdrojom [3].

3.2 Stabilita prevádzky elektrizačnej sústavy

Zlepšiť stabilitu prevádzky elektrizačnej sústavy je možné napr. zariadením TCBR (tyristorovo riadeným brzdným rezistorom).

Tyristorovo riadený brzdný rezistor je tyristorovo spínaný (obvyčajne lineárny) rezistor paralelne pripájaný k sieti.

TCBR môže byť využívaný za účelom:

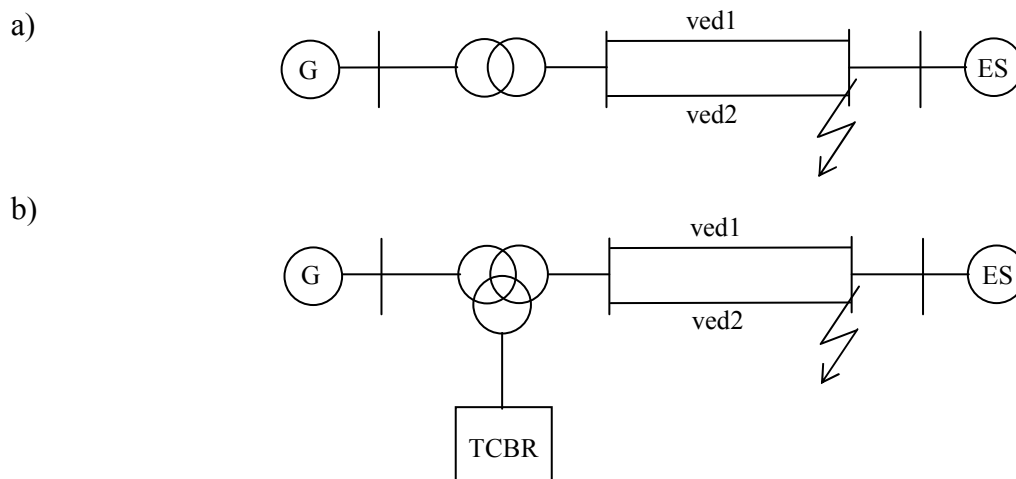
1. Prevencie dynamickej nestability počas prvého kyvu po poruche spotrebovaním energie, ktorá by v opačnom prípade spôsobila zvýšenie uhlovej rýchlosti (urýchlenie) generátora.
2. Prevencie dynamickej nestability zlepšením tlmenia nízkofrekvenčných oscilácií medzi synchronne prepojenými elektrizačnými sústavami.
3. Tlmenia subsynchronných oscilácií vznikajúcich pri sériovej kompenzácií vedení kondenzátormi.
4. Uľahčenia synchronizácie turbogenerátorov. Fázovo posunutá synchronizácia turbogenerátorov môže vyvolať momenty hriadeľa s horšími dopadmi ako trojfázový skrat na svorkách generátora.

Použitie TCBR môže byť v mnohých prípadoch výhodnejšie ako použitie iných zložitejších a nákladnejších FACTS regulátorov. Najlepšie umiestnenie TCBR je v blízkosti generátora, ktorý vyžaduje zníženie akceleračného výkonu počas prechodných nestabilných podmienok. Vhodné je pripájať TCBR k vedeniu cez terciár trojvlnuťového transformátora, a to v zapojení trojuholník, pretože spojenie so zemou nie je potrebné.

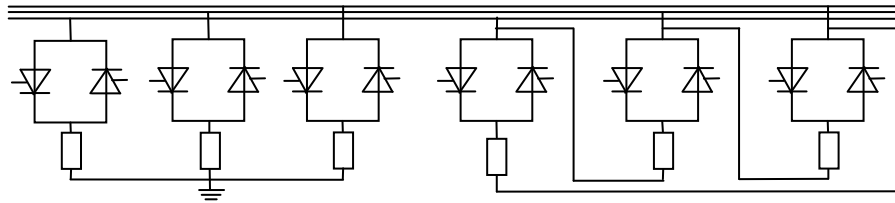
Použitie TCBR na zlepšenie dynamickej stability elektrizačnej sústavy

Uvažujme synchronný alternátor pracujúci v elektrizačnej sústave podľa zapojení na obr. 10a a 10b, pričom predpokladajme bezstratovú sústavu .

V prvom prípade nie je uvažované s TCBR a v druhom prípade je cez terciár transformátora pripojený TCBR slúžiaci na zníženie akceleračného výkonu alternátora počas poruchy.



Obr. 10: Schéma zapojenia elektrizačnej sústavy a) bez použitia TCBR, b) s použitím TCBR

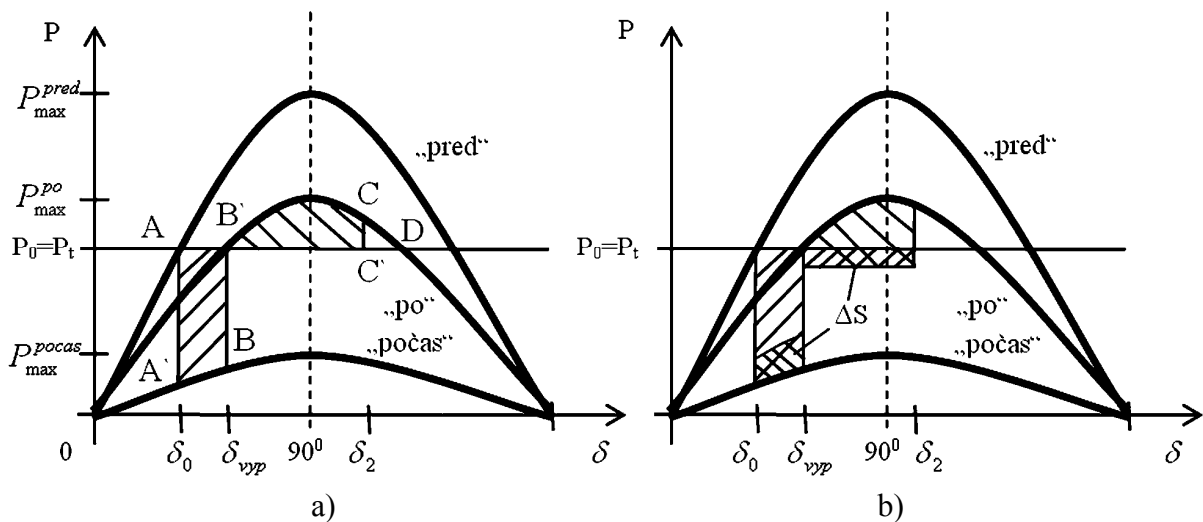


Obr. 11: Zapojenie TCBR do hviezdy a do trojuholníka

Použitie TCBR na zlepšenie dynamickej stability elektrizačnej sústavy je vysvetlené na výkonových charakteristikách (závislosť činného výkonu P od záťažového uhla δ) s využitím metódy pravidla plôch slúžiacej na kvalitatívne posúdenie dynamickej stability sústavy a určenie kritickej hodnoty záťažového uhla δ_{krit} .

Prípad bez použitia TCBR

Na obrázku 11a sú znázornené výkonové charakteristiky charakterizujúce prevádzku alternátora v elektrizačnej sústave bez použitia TCBR.



Obr. 12: Výkonová charakteristika a) bez použitia TCBR, b) s použitím TCBR

Charakteristika „pred“ znázorňuje funkčnú závislosť činného výkonu na svorkách alternátora v závislosti od záťažového uhla synchronného stroja (mechanické vychýlenie magnetickej osi synchronne bežiacieho rotora vplyvom zaťaženia, z polohy príslušnej chodu naprázdno) pred poruchou. Charakteristika „počas“ znázorňuje výkonovú charakteristiku počas poruchy (trojfázový skrat na jednom z prenosových vedení – ved2) a charakteristika „po“ znázorňuje výkonovú charakteristiku po poruche (vypnutie poškodeného vedenia).

Pre maximálne výkony v jednotlivých štádiách platí: $P_{max}^{pred} > P_{max}^{po} > P_{max}^{pocas}$.

Bod A reprezentuje ustálený stav pred poruchou. V tomto bode je rovnováha medzi dodávaným výkonom turbíny P_t a výkonom P_0 odoberaným z alternátora pri uhle δ_0 .

Po skokovej zmene impedancie (trojfázový skrat na vedení ved2) nastáva pokles výkonu z bodu A do bodu A'. Záťažový uhol sa po skokovej zmene impedancie, v dôsledku zotrvačnosti turbogenerátora, nemôže zmeniť okamžite a zostáva na hodnote δ_0 . Zmení sa ale výkon odoberaný z alternátora na hodnotu P_0' .

Keďže odoberaný výkon P_0' je menší ako dodávaný výkon P_t (ktorý považujeme za konštantný počas celého prechodného deja), dochádza k vzniku urýchľujúceho výkonu ΔP_0 ,

ktorý má v okamihu skratu na vedení hodnotu: $\Delta P_0 = P_0 - P_0' > 0$. Urýchľovanie stroja znamená zväčšovanie uhla δ z bodu A' po krivke „počas“.

V bode B dochádza k vypnutiu poškodeného vedenia pri uhle δ_{vyp} a k posunu na bod B' na krivke „po“.

Pri ďalšom zvyšovaní záťažového uhla odoberaný výkon prevyšuje mechanický príkon. Tým sa urýchľujúci výkon stáva brzdiacim. Podľa zákonov mechaniky bude za bodom B' uhlové zrýchlenie záporné. Uhlová rýchlosť rotora klesne až na hodnotu synchronnej uhlovej rýchlosti (bod C). Dôjde teda k spomaleniu chodu vplyvom retardačného výkonu.

Stav rovnováhy výkonov však v bode C nenastáva, pretože odoberaný výkon prevyšuje dodávaný mechanický príkon. Stroj bude ďalej ubrzďovaný, uhol δ sa bude znižovať a uhlová rýchlosť klesá pod synchronnu uhlovú rýchlosť ($\Delta\omega$ je záporné). Tento stav trvá dovtedy, pokiaľ uhol neklesne na hodnotu δ_{vyp} (bod B'), teda pokiaľ nedôjde k rovnováhe výkonov. Tu sa retardačný výkon zmení na akceleračný a uhlová rýchlosť vzrastá. Nastáva kývanie rotora sústrojenstva okolo rovnovážnej polohy s uhlom δ_{vyp} . Ak zanedbáme tlmiace účinky (vplyv vinutia rotora, trenie, atď.), má kývanie netlmený periodický charakter. Pri pôsobení tlmenia amplitúda kyvov postupne klesá, až sa uhol ustáli na hodnote δ_{vyp} a uhlová rýchlosť na synchronnej uhlovej rýchlosti.

Porovnaním veľkosti akceleračnej a retardačnej plochy vieme posúdiť, či sústava ostane po uplynutí prechodného deja stabilná alebo nie. Aby stabilita sústavy ostala zachovaná musí platiť pravidlo plôch: $S^+ < S^-$. Hranica stability je taká hodnota δ_2 , pri ktorej platí $S^+ = S^-$. Kde S^+ je plôška ohraničená bodmi AA'BB' a S^- je plôška ohraničená bodmi B'CC'.

Pokiaľ nebude prekročený bod D, nedôjde k strate stability.

Čím skôr sa dosiahne vyrovnanie retardačnej plochy s akceleračnou plochou (čím je uhol δ_2 menší) tým lepšie z hľadiska stability sústavy.

Veľkosť uhla δ_2 je možné ovplyvniť rýchlosťou vypnutia poruchového vedenia (od čoho priamo závisí uhol δ_{vyp}) a veľkosťou akceleračnej a retardačnej plochy (energie).

Prípád s použitím TCBR

Regulátorom TCBR je možné ovplyvňovať veľkosť akceleračnej (znižovať) a retardačnej (zvýšovať) plochy (energie) za účelom zlepšenia dynamickej stability sústavy.

Na obrázku 11b sú znázornené výkonové charakteristiky charakterizujúce prevádzku alternátora v elektrizačnej sústave pri použití TCBR na zníženie akceleračného výkonu alternátora počas poruchy a zvýšenie retardačného výkonu po vypnutí poruchy za účelom zlepšenia dynamickej stability sústavy. Hodnota uhla δ_2 je v tomto prípade menšia ako v prípade bez použitia TCBR. Veľkosť ovplyvnenia akceleračnej respektíve retardačnej plochy (energie) regulátorom TCBR závisí od jeho menovitého výkonu.

Pozn.: Kapitola 3.2 bola spracovaná použitím literatúry [5] a [7].

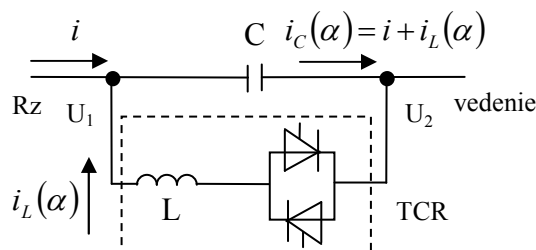
3.3 Hospodárnosť prevádzky elektrizačnej sústavy

Na reguláciu tokov činného výkonu v elektrizačnej sústave a zvýšenie prenosových schopností vedení je možné použiť niekoľko FACTS zariadení. Jedným z nich je aj

tyristorovo spínaný sériový kondenzátor (TCSC), ktorého funkcia je bližšie popísaná v tejto kapitole.

TCSC je kompenzátor pozostávajúci z kondenzátora, ku ktorému je paralelne pripojená tyristorom riadená tlmivka (TCR). Zmena impedancie TCSC sa dosahuje meniacou sa tyristorovo riadenou indukčnou reaktanciou tlmivky paralelne zapojenou ku kondenzátoru. Veľkosť indukčnej reaktancie je určená uhlom zopnutia tyristorov α .

Tento výkonový prvok sa zapojuje do série s vedením (do vývodu) a umožňuje meniť svojim pôsobením impedanciu prenosovej cesty a tým ovplyvňovať toky výkonov. Regulácia je rýchla, účinná a zvyšuje medze prenášaného výkonu. Základná schéma zariadenia TCSC je uvedená na nasledovnom obrázku.



Obr. 13: Základná schéma TCSC

Veľkosť indukčnej reaktancie takéhoto kompenzátora je určená vzťahom:

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C \cdot X_{TCR}(\alpha)}{X_{TCR}(\alpha) - X_C} \quad (1)$$

Kde $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$ je kapacitná reaktancia kondenzátora a C je jeho kapacita.

Pri dostatočne malej reaktancii tlmivky voči reaktancii kondenzátora ($X_L < X_C$), prevádzkový diagram TCSC (obr. 13) obsahuje indukčný a kapacitný režim prevádzky TCSC, pričom prechod medzi oblasťami tvorí oblasť rezonancie.

Pri $\alpha = 0$ je reaktancia TCR minimálna, kondenzátor je premostený zariadením TCR, impedancia TCSC má indukčný charakter a dosahuje minimum.

Pri $\alpha \in \langle 0, \alpha_{L\lim} \rangle$ je reaktancia TCR menšia ako reaktancia kondenzátora a impedancia TCSC má indukčný charakter.

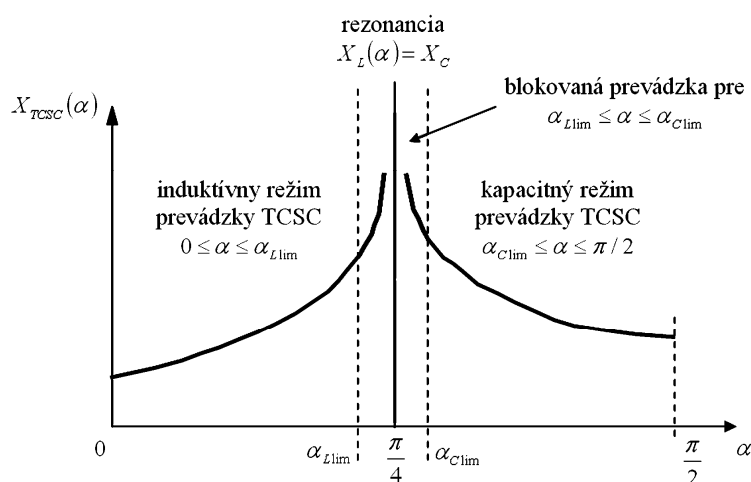
Oblasť vymedzená s $\alpha \in \langle \alpha_{L\lim}, \alpha_{C\lim} \rangle$ tvorí oblasť, v ktorej nie je zariadenie TCSC prevádzkované.

Pri $\alpha = \pi/4$ je reaktancia TCR rovná reaktancii kondenzátora, nastáva rezonancia a impedancia TCSC má teoreticky nekonečnú hodnotu.

Pri $\alpha \in \langle \alpha_{C\lim}, \pi/2 \rangle$ je reaktancia TCR väčšia ako reaktancia kondenzátora a impedancia TCSC má kapacitný charakter.

Pri $\alpha = \pi/2$ je reaktancia TCR teoreticky nekonečná, impedancia TCSC má kapacitný charakter a rovná sa hodnote X_C .

Prevádzkový diagram TCSC s vyznačenými režimami prevádzky je znázornený na nasledovnom obrázku.



Obr. 14: Prevádzkový diagram TCSC

Kompenzátor TCSC nie je zdrojom žiadneho výkonu, ale dokáže zmenou impedancie prenosovej cesty, do ktorej je inštalovaný ovplyvňovať tok výkonov v sieťach. Zariadenia TCSC sa umiestňujú obvykle priamo do vývodu vedenia z rozvodne.

V skutočnosti sú všetky veličiny a parametre popisujúce stav v sieti komplexné (výkon, napätie, impedancia, admitancia a pod.). Pre zjednodušenie analýzy je možné prijať nasledovné predpoklady:

Pretože činný odpor prenosových vedení je vzhľadom k ich induktívnej reaktancii malý, pri nasledovnom popise sa s ním neuvažuje ($R = 0$).

U zaťažených vedeniach v našej prenosovej sústave je možné pre zjednodušenie neuvažovať s priečnou admitanciou vedenia ($B = 0$).

Činný výkon prenášaný vedením medzi uzlami 1 a 2 je priamo úmerný napätiam U_1 a U_2 , rozdielu záťažových uhlov δ_1 a δ_2 a nepriamo úmerný výslednej reaktancii (impedancii) X_{ved} vedenia:

$$P_{12} = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_{ved}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2)$$

Zo vzťahu (2) vyplýva, že ovplyvňovať tok výkonu po vedení je možné zmenou výslednej reaktancie (impedancie) prenosovej cesty.

Ak je do vývodu umiestnený TCSC, tak prenášaný výkon je možné určiť nasledovnou rovnicou:

$$P_{12}'' = P_{12} \pm \Delta P = \frac{U_1 \cdot (U_2 \pm \Delta U)}{X_{ved} \pm \Delta X} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2 \pm \Delta \delta) \quad (3)$$

Kde:

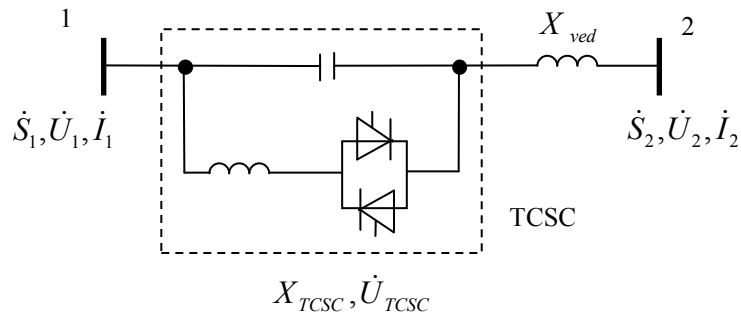
ΔU je zmena napätia v uzle 2 spôsobená zmenou reaktancie vedenia,

ΔX je zmena reaktancie prenosovej cesty, ktorá je pre účinnosť regulácie tokov výkonov v sieťach zariadením TCSC rozhodujúca,

$\Delta \delta$ je zmena uhla prenosu (záťažového uhla) spôsobená zmenou reaktancie prenosovej cesty.

Ďalej je prostredníctvom fázorových diagramov popisujúcich stav na prenosovej ceste pozostávajúcej zo zariadenia TCSC sériovo pripojeného k prenosovému vedeniu znázornená zmena napätia, reaktancie prenosovej cesty a uhla prenosu spôsobená zariadením TCSC.

Schéma uvažovanej prenosovej cesty medzi dvoma uzlami:



Prúd v uzle 1 a v uzle 2: $\dot{I}_1 = \frac{\dot{S}_1}{\sqrt{3}\dot{U}_1}$, $\dot{I}_2 = \frac{\dot{S}_2}{\sqrt{3}\dot{U}_2}$.

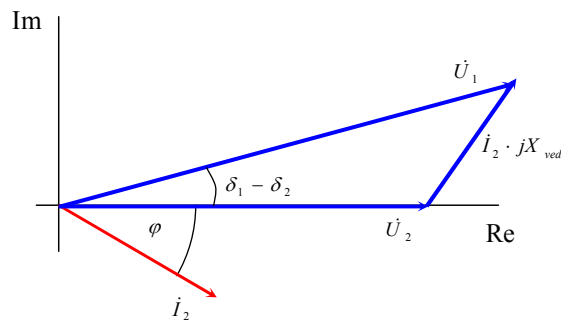
Fázor napätia na TCSC: $\dot{U}_{TCSC} = \dot{I}_2 \cdot (\pm jX_{TCSC})$, kde znamienko pri reaktancii závisí od režimu prevádzky TCSC.

Zmena napätia v prenosovej ceste spôsobená zariadením TCSC: $\Delta U = |\dot{U}_{TCSC}|$.

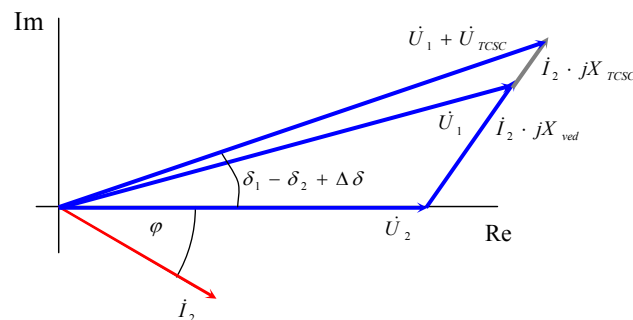
Zmena reaktancie prenosovej cesty spôsobená zariadením TCSC: $\Delta X = |\pm jX_{TCSC}|$.

Predpokladajme 3 prevádzkové stavy: bez uvažovania TCSC, s uvažovaním TCSC v induktívnom režime prevádzky a s uvažovaním TCSC v kapacitnom režime prevádzky.

Stav na prenosovej ceste bez uvažovania TCSC:

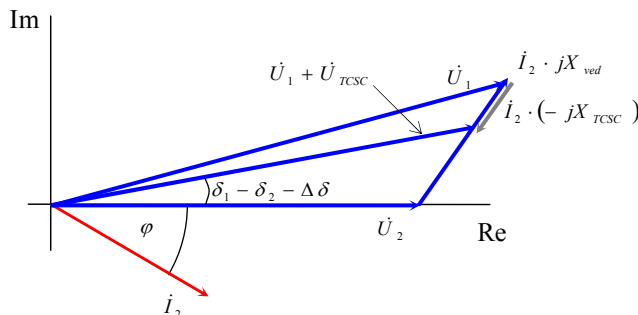


Stav na prenosovej ceste s použitím TCSC v induktívnom režime prevádzky:



Pretože reaktancia prenosového vedenia má induktívny charakter, vložení TCSC a jeho prevádzkou v induktívnom režime sa zvýši úbytok napätia na prenosovej ceste, zníži sa prenášaný činný výkon a zvýši sa uhol prenosu.

Stav na prenosovej ceste s použitím TCSC v kapacitnom režime prevádzky:



Prevádzkou TCSC v kapacitnom režime prevádzky je možné v prenosovej ceste s prevažujúcim induktívnym charakterom znížiť úbytok napätia, zvýšiť prenášaný činný výkon a znížiť uhol prenosu. Stupňom sériovej kompenzácie v kapacitnom režime prevádzky sa nazýva pomer: $k = X_{TCSC} / X_{ved}$, $0 \leq k < 1$.

Zoznam použitej literatúry

- [1] BERAN, J.: *FACTS – Inovační prostředky řízení elektrizační soustavy*. In: Řízení napětí a jalových výkonů v elektrizační soustavě České republiky – aktuální otázky elektroenergetiky – 3. ročník: Zborník prednášok. Praha: EGÚ Praha Engineering, a.s., 1998. s. 61-70.
- [2] BOJRUP, M.: *Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application*. Universitetstryckeriet – Lund University, 1999, 124 s., ISBN 91-88934-13-6
- [3] GRIGER, V., GRAMBLIČKA, M., NOVÁK, M., POKORNÝ, M.: *Prevádzka, riadenie a kontrola prepojenej elektrizačnej sústavy*. Žilina: Vydavateľstvo ŽU, 2001, 236 s. ISBN 80-7100-823-0.
- [4] HABUR, K., O'LEARY, D.: *FACTS For Cost and Reliable Transmission of Electrical Energy*. Germany. 11 s. [online] [cit.2005-06-17], Dostupné z: <http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf>.
- [5] HINGORANI, G. N., GYUGYI, L.: *Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. New York: IEEE Press, 2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8
- [6] KUNDUR, P.: *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994, 1176 s. ISBN 0-07-035958-X.
- [7] MEŠTER, M.: *Analýza hraničných podmienok stability pri rôznych typoch poruchových stavov*: Dizertačná práca. Košice: KEE FEI TU, 2004. 129 s.
- [8] MEŠTER, M., CHLADNÝ, V.: *Metodiky výpočtov dynamickej stability v reálnom čase*, Zborník: I. Medzinárodné vedecké sympóziu Elektroenergetika, Vysoké Tatry - Stará Lesná, 2001, SR, s.281-284. ISBN 80-88922-34-8.
- [9] SZATHMÁRY, P.: *Kvalita elektrickej energie*. PRO, s.r.o., Banská Bystrica, 2003, 122 s., ISBN 80-89057-04-7
- [10] SZUBERT, K., PLENZLER, G.: *Stepless Controlled Interphase Power Controller*. Poznan: Poznan University of Technology. 3 s.
- [11] S&C Electric Company: *S&C PureWave DVR Dynamic Voltage Restorer*. 2002. [online] [cit.2005-06-20] Dostupné z: <http://www.sandc.com/edocs_pdfs/EDOC_005384.pdf>.
- [12] KOLCUN, M., BEŇA, Ľ., MĚSZÁROS, A., RUSNÁK, J.: *Riešenie problémov v riadení prevádzky elektrizačných sústav s využitím FACTS zariadení*. In: Elektroenergetika 2005 : Zborník z 3. vedeckého sympózia : 21.-23. september 2005, Stará Lesná, Vysoké Tatry. Košice : FEI-TU v Košiciach, 2005. 23 s. ISBN 80-8073-305-8.