

Branislav Dobrucký – Juraj Altus – Pavol Špánik \*

## SYNERGICKÉ PÔSOBENIE VÝKONOVEJ ELEKTRONIKY, ELEKTRICKEJ TRAKCIE A ELEKTROENERGETIKY

### SYNERGIC INFLUENCE OF POWER ELECTRONICS, ELECTRIC TRACTION AND ELECTRO-ENERGETICS

*Príspevok sa zaoberá implementáciou nových progresívnych technológií výkonovej elektroniky v oblasti elektrickej trakcie, za účelom zmiernenia jej spätného vplyvu na elektroenergetickú sieť. Sú to predovšetkým pružné striedavé systémy prenosu energie (FACTS), ktoré elektronickou cestou na jednej strane obmedzujú nepriaznivé vplyvy elektrickej trakcie, na druhej strane vylepšujú parametre elektroenergetickej siete. Svojimi účinkami sa zatiaľ v elektrickej trakkii najviac presadzujú výkonové aktívne filtre (PAF), ktoré umožňujú tak kompenzáciu základnej harmonickkej, ako aj vyšších harmonických zložiek a slúžia na prispôbenie energetických systémov normám elektromagnetickej kompatibility (EMC). Využitím uvedených progresívnych technológií je možné dosahovať zvýšenú efektívnosť prenosu elektrickej energie do trakčnej siete.*

#### 1. Implementácia výkonovej elektroniky v modernizovaných elektrických trakčných zariadeniach

Výkonová elektronika už od svojho vzniku pôsobila v elektrickej trakkii ako katalyzátor vývojových trendov elektrických trakčných zariadení. Ide pritom o implementáciu v troch oblastiach: polovodičové meniče pre napájacie stanice striedavej elektrickej trakcie 25 kV/16 2/3 Hz, diódové usmerňovače pre napájacie stanice jednosmernej elektrickej trakcie 600 – 3 000 V a polovodičové meniče pre trakčné pohony elektrických hnacích vozidiel [3]. Rozvoj technológie výroby výkonových polovodičových prvkov spôsobil pokles ich ceny, nárast spoľahlivosti a medzných parametrov týchto prvkov, ktoré sú základnými komponentmi polovodičových meničov. Všetky polovodičové meniče však princípom svojej činnosti predstavujú pre elektrizačnú sústavu nelineárnu záťaž. Pripojením takejto záťaže (napr. usmerňovača alebo frekvenčného meniča) na zdroj striedavého harmonického napätia so sieťovou frekvenciou, dôjde vplyvom nelinearity k odoberaniu neharmonického prúdu.

Najjednoduchším spôsobom na kompenzovanie induktívneho účinníka prvej harmonickkej je použitie kompenzačných kondenzátorov. Tieto kondenzátory tvoria v podstate zdroj jalového výkonu pre kompenzované zariadenie. Najväčší nedostatkom tohto jednoduchého spôsobu kompenzácie účinníka je, že pre každú zmenu

*The contribution addresses the implementation of new progressive technologies in the field of electric traction in order to reduce feedback influence on the power network. First of all, it concerns Flexible Alternating Current energy Transmission Systems (FACTS), which, on the one hand, limit negative influence of the electric traction; on the other hand, they improve parameters of the power network by an electronic method. Taking their effects into account, the Power Active Filters (PAF) muddle through at most, because they allow compensation of fundamental harmonics, higher harmonics and also help to adapt energetic systems to Electromagnetic Compatibility (EMC) standards. Using the mentioned progressive technologies it is possible to achieve a higher value of effectiveness of electric energy transmission to a traction network.*

#### 1. Implementation of Power Electronics in Modernized Electric Traction Facilities

Power electronics, from its inception, always took the role of catalysis of electric traction evolution trends. It is divided into three main areas: semiconductor converters for 25kV, 16 2/3 Hz AC electric traction supply stations, diode rectifiers for 600 – 3000 V DC electric traction supply stations and semiconductor converters for electric vehicle traction drives [3]. The development of power semiconductor elements production technology caused price reducing, reliability increase and the increase of those elements marginal parameters, which are the semiconductor converters basic components. However, all the semiconductor converters, by their operating principle, present a non-linear load for an electric power network. Connecting such a load (e.g. rectifier or frequency converter) to a harmonic AC voltage source of network frequency comes to a non-harmonic current flow caused by non-linearity.

The simplest way to compensate for the inductive power factor of elementary harmonic is by use of compensating capacitors. Basically, they represent a reactive power source for compensated facilities. The dominant drawback of this simple compensation concept is that for every reactive current flow change, it is necessary to change the compensation capacity connected to it. Therefore, lack of dynamics, which is needed for fast varying size of

\* Branislav Dobrucký, Juraj Altus, Pavol Špánik

Department of Electrical Traction and Energetic, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, SR  
E-mail: dobrucky@fel.utc.sk, altus@fel.utc.sk, spanik@fel.utc.sk

odoberaného jalového prúdu je potrebné zmeniť aj veľkosť pripojenej kompenzačnej kapacity. Teda tento spôsob nemá potrebnú dynamiku, ktorá sa požaduje pre kompenzáciu účinníka tak rýchlo sa meniacich záťaží, akými polovodičové meniče nesporne sú a navyše nerieši problematiku vyšších harmonických a nesúmer-ných odberov.

Ďalšia možnosť ako kompenzovať účinník prvej harmonickej je použitie statického kompenzátora reaktívneho výkonu – meniča impedancie. Tento menič svojimi vlastnosťami umožňuje kompenzovať s vysokou dynamikou, avšak neumožňuje filtrovať a spravidla ani symetrizovať. Práve naopak, je zdrojom vyšších harmonických [1], [28].

Filtrovanie vyšších harmonických je možné použitím rezonančných sériových R-L-C filtrov, ktoré sú naladené na jednotlivé nežiaduce frekvencie. Úskaliami tohoto spôsobu filtrovania spočívajú v nedostatočnej selektivitě týchto rezonančných obvodov, v ich veľkých rozmeroch, v značnej cene a v neposlednom rade v ich silnej závislosti od pretekaného prúdu (nelinearity indukčnosti).

V 80-tych a 90-tych rokoch predchádzajúceho storočia boli vyvinuté nové progresívne technológie v oblasti elektrickej trakcie, týkajúce sa tak nových typov meničových pohonov striedavej trakcie, ako aj zvyšovania efektívnosti prenosu elektrickej energie a aj elektromagnetickej kompatibility v trakčných systémoch. Z prvých spomínaných technológií sú to predovšetkým: priame momentové riadenie trakčného pohonu s výbornými dynamickými vlastnosťami a minimalizovanými komutačnými stratami [4], štvorkvadrantový menič, používaný vo funkcii vstupného (aj rekuperačného) impulzového usmerňovača trakčného vozidla [5]–[6], ako aj viacúrovňové zapojenia trakčných meničov [7]. Tieto sú podrobnejšie opísané na inom mieste tohto časopisu a v prácach [9], [12], [15], [19], [27]. Z druhých zmienených progresívnych technológií sú to: pružné systémy striedavého prenosu elektrickej energie [11], [14], [21] – [24] a z nich ako samostatná skupina statické kompenzátory a výkonové aktívne filtre [8], [10], [17], [18], [20], [23], [25], [26], [28]. Tieto budú pre svoju dôležitosť a progresívnosť podrobnejšie opísané v ďalších kapitolách. Takže výkonová elektronika sa spätne uplatňuje pri znižovaní vplyvu elektrických trakčných zariadení, najmä v striedavej trakkii s usmerňovačovými lokomotivami, na elektroenergetickú sieť.

## 2. Flexibilné výkonové systémy na prenos elektrickej energie (FACTS – Flexible AC Transmission Systems) [11], [14], [21], [22], [24]

Pružné systémy prenosu elektrickej energie patria medzi progresívne technológie v elektro-energetike a úzko súvisia s rozvíjajúcou sa terciárnou reguláciou. Zavedenie pružných prenosových striedavých systémov si vynútili meniace sa hraničné podmienky na poli elektro-energetického napájania a bolo umožnené schopnosťou a vlastnosťami výkonových elektronických komponentov vysokých výkonov a koncepciou adaptívneho prenosu energie. Rýchle riadenie toku činného a reaktívneho výkonu, resp. energie, rovnako ako aj regulácia napätia, si vyžadujú aplikáciu zariadení výkonovej elektroniky.

loads is typical for this kind of compensation, and in addition, it does not solve higher harmonics- or non-symmetric flow problems.

Another alternative to compensate for the power factor of fundamental harmonic is the reactive power static compensator (impedance converter) use. This converter, by its own performance, enables high compensation dynamics; though, it is neither able to filter nor to symmetries. On the contrary, it is the higher harmonics source [1], [28].

Filtration of higher harmonics is possible by using serial resonant R-L-C filters, which are tuned to particularly unwanted frequencies. The drawbacks of this method consist of sub-marginal selectivity of those resonant circuits, in large dimensions, big price and, last but not least, in strong dependence on current flow (inductance non-linearity).

In the 1980's and 1990's there were some progressive technologies invented in the field of electric traction concerning new types of converter drives for AC traction, rising effectiveness of electric energy transmission and electromagnetic compatibility of traction systems. The most important elements of those technologies are: direct moment control of traction drive with excellent dynamic performances and minimum commutation losses [4], four-quadrant converter used as entry (also recuperative) pulse rectifier of traction vehicle [5], [6] and multilevel schemes of traction rectifiers [7]. A detailed description of them can be found in this journal and in works [9], [12], [15], [19], [27]. Other mentioned progressive technologies are: flexible AC electric energy transmission systems [11], [14], [21] – [24], static compensators and active power filters [8], [10], [17], [18], [20], [23], [25], [26], [28]. Those, due to their importance and progressivism, will be described in detail in following chapters. Thus, power electronics is re-applied in decreasing electric traction facilities influence (mainly in AC traction with rectifier equipped engines) on a power network.

## 2. Flexible AC Transmission Systems [11], [14], [21], [22], [24]

Flexible electric energy transmission systems belong to progressive technologies in electro-energetics with a strong concern in developing tertiary control. Implementation of flexible AC electric energy transmission systems was forced by varying marginal conditions in the field of electro-energetic supplement and was allowed by high-power electronic components abilities and attributes, and adaptive electric energy transmission conception. Both fast active and reactive power (energy) flow control and voltage control require application of power electronics.

Thus FACTS present the static electronic devices - power controllers to increase the controllability and transmission capacity of energetic systems. Their implementation allows a wider use of contemporary transmission systems without an extensive expansion by means of:

Prenosové systémy FACTS zahrňujú teda statické elektronické zariadenia (FACTS Devices) – výkonové regulátory, aby bola zvýšená riaditeľnosť a prenosová kapacita energetických systémov. Ich implementácia umožňuje širšie využitie súčasných už existujúcich prenosových systémov bez extenzívneho rozvoja, prostredníctvom:

- adaptívneho riadenia toku výkonu (činného aj reaktívneho),
- zvýšenie výkonovej kapacity prenosu,
- rýchleho riadenia napätia (rýchlej odozvy na zmenu požadovaného napätia).

Veľká skupina zariadení označených skratkou FACTS sa používa na zvýšenie prenosových schopností vedení a na reguláciu tokov činných a jalových výkonov v elektrizačných sieťach. Vyrábajú sa s inštalovaným výkonom  $\pm 100$  MVar. Tok výkonu prenosovou sústavou je pritom ohraničený: hranicou stability, tepelnou hranicou, napäťovým ohraničením, kruhovými tokmi výkonu. Obmedzenia pri prenose elektrickej energie môžeme vyriešiť buď budovaním nových prenosových kapacít alebo použitím nových progresívnych technológií, ktoré prichádzajú v podobe zariadení FACTS. Medzi množinu FACTS, ktoré sa používajú na zvýšenie prenosových kapacít, patria 3 skupiny zariadení:

- *statické kompenzátory jalového výkonu*, určené na kompenzáciu reaktívneho výkonu základnej harmonickej zložky v paralelnom a sériovom zapojení (klasický statický VAR kompenzátor s riadenou tlmičkou, tyristorovo riadený a spinaný sériový kondenzátor),
- *aktívne dynamické kompenzátory*, určené na kompenzáciu reaktívneho výkonu základnej harmonickej zložky v paralelnom a sériovom zapojení (statický synchronný kompenzátor, statický synchronný sériový kompenzátor),
- *aktívne regulátory napätia a činného aj jalového výkonu* (univerzálny regulátor toku výkonu).

Prvá skupina kompenzátorov využíva na spínanie poloriadené výkonové polovodičové prvky (obyčajné tyristory), preto regulujú iba okamih pripojenia a tým veľkosť napätia pripojeného na kompenzačný prvok, čím sa mení veľkosť a fáza kompenzačného prúdu. Tvar kompenzačného prúdu je však určený charakterom záťaže, t. j. kompenzačného zariadenia. Ich reakčná doba je preto 1–2, príp. viac periód napájacieho napätia.

Skupina aktívnych zariadení FACTS sa líši od prvej skupiny hlavne tým, že priebeh kompenzačného prúdu vytvára *aktívnym spínaním* výkonových polovodičových prvkov a ich reakčná doba je podstatne menšia ako v prvej skupine a môže byť menšia ako 1/6 periód napájacieho napätia. Tak isto aj deformačný výkon vytváraný spínaním polovodičových prvkov je podstatne menší ako v prvom prípade.

Do skupiny aktívnych kompenzátorov by sme mohli zaradiť aj výkonové aktívne filtre, ktorých pôvodné určenie je kompenzácia, či filtrovanie vyšších harmonických zložiek záťažového prúdu. Tým síce zlepšujú kvalitu dodávanej a odoberanej energie, ale na zvýšení prenosovej kapacity sústavy sa to prejaví iba v malej miere. Preto tvoria samostatnú skupinu kompenzačných zariadení. V princípe však výkonové aktívne filtre môžu kompenzovať aj jalový výkon a účinník základnej harmonickej, ako ukáže výpočet referenčnej hodnoty kompenzačného prúdu v kap. 3.

- adaptive power (both active and reactive) flow control,
- power transmission capacity increase,
- fast voltage control (fast response on voltage required value).

A large group of facilities marked with the FACTS acronym is used for the transmission lines capacity increasing and for active and reactive power flow control in electrified network. The power flow through the transmission system is, at the same time, limited by: stability-, thermal- and voltage limits, and circular power flow. The limitations of the electrical energy transmission can be solved either by a new transmission capacity building or by using new progressive technologies, which come as FACTS devices-wise. There are three groups of the transmission capacity increasing FACTS devices, which are:

- *static reactive power VAR compensators*, dedicated for compensation of fundamental harmonic reactive power, in parallel- and serial connection (classical static VAR compensator with controlled reactor, thyristor-controlled- and a switched serial capacitor),
- *active dynamic compensators*, dedicated for compensation of fundamental harmonic reactive power, in parallel- and serial connection (static synchronous compensator, static synchronous serial compensator),
- *active controllers of voltage and active- and reactive power* (unified power flow controller).

The first group of compensators uses the half-controlled power semiconductor devices (ordinary thyristors). Therefore, they can control instant of switching and the consequently value of the voltage connected to the compensating element. By this, it can control the magnitude and phase of compensation current. But the shape of the compensation current is determined by the nature of the load, i.e. by compensation device. The reaction time of those compensators is, therefore, more than 1–2 periods of the supply voltage.

The group of the active FACTS facilities differs from the first one mainly in that the shape of compensation current is creating by active switching of power semiconductor devices. Their reaction time is, therefore, essentially smaller to the first group and can be smaller than 1/6 of the period of supply voltage. The distortion power created by the switching of semiconductor devices is also essentially smaller than in the previous case.

The active power filters can be included into the active group of compensators since their original purpose is compensation of higher harmonics of load current. In spite of improvement of the quality of delivered and regenerated energy this way, the system transmission capacity rising will only be affected by the small measure. So, the filters present a special separated group of the compensation facilities. However, the power active filters can compensate for the reactive power and power factor of the fundamental harmonic component, as described in the compensation current reference value calculation in the next chapter.

Beside this, further groups of FACTS facilities do exist as dynamic restorers and uninterruptible power supplies (UPS),

Okrem toho existujú ďalšie skupiny zariadení FACTS kde patria dynamické reštaurátory napätia a výkonové záskokové zdroje (UPS - Uninterruptible Power Supply), ktoré podstatne zvyšujú spoľahlivosť a kvalitu dodávanej elektrickej energie.

V ďalšom texte opíšeme jednotlivé zariadenia FACTS so stručnou charakteristikou a oblasťou použitia.

*Statický kompenzátor reaktívneho výkonu (SVC - Static VAR Compensator)*

Statické kompenzátory reaktívneho výkonu sú elektronické zapojenia v kombinácii s reaktívnymi prvkami (cievka, kondenzátor), ktorých výkon reguluje dvojica protismerne zapojených tyristorov (obr. 1). V prípade cievky, môže byť táto plynulo fázovo riadená, alebo iba spínaná celočíselným počtom polperiód. Druhý spôsob nie je síce plynulý, avšak má výhodu v tom, že nevytvára vyššie harmonické. Cievka je vyhotovená bez feromagnetického jadra, z dôvodu zahrievania vyššími harmonickými. Podobným spôsobom môže byť spínaný aj výkonový kondenzátor, ktorý môže byť pripájaný mechanickým spínačom. Z hľadiska pripojenia k sieti ide o paralelný VAR kompenzátor. Priebeh fázového prúdu v jednej polperióde napájacieho napätia je na obr. 1a.

Pre prvú harmonickú je možné pri zanedbaní odporov získať vzťah, ktorý udáva závislosť amplitúdy prúdu prvej harmonickej od riadiaceho uhla.

$$I_1(\alpha) = \sqrt{6} \cdot (U/Z) [1 - 2\alpha/\pi - \sin(2\alpha/\pi)]$$

Statické VAR-kompenzátory sú v prevádzke v rôznych vyhotoveniach. Ich typické zapojenia sú na obr. 1. Vo väčšine prípadov ide o kombinácie výkonových spínacích súčiastok s kondenzátorom alebo reaktorom, príp. tlmivkou, akými sú:

- tyristorovo riadený reaktor, resp. tlmivka (TCR),
- tyristorovo spínaný kondenzátor (TSC),
- tyristorovo spínaná tlmivka (TSR),
- mechanicky spínaný kondenzátor (MSC).

Statické kompenzátory SVC sa môžu použiť pre nasledujúce typy úloh:

- dynamická stabilizácia napätia, lepšia schopnosť prenosu energie, zníženie vyšších harmonických napätia,
- zlepšenie synchronnej stability, vyššia dynamická stabilita, lepšie tlmenie sústavy,
- dynamické vyrovňovanie záťaže,
- udržiavanie napätia v statickej prevádzke.

*Tyristorovo riadený sériový kondenzátor (TCSC - Thyristor Controlled Serial Capacitor)*

Zapojenie pozostáva z výkonového kondenzátora, premosteneho s tyristorovo riadenou cievkou, resp. reaktorom. Proti spína-

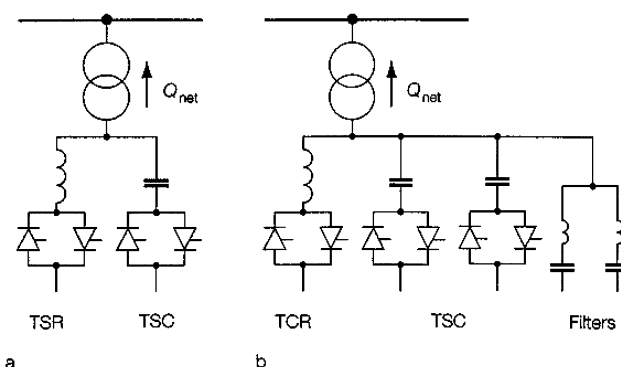
which essentially increase the reliability and quality of delivered electric energy.

In the next text the pointed FACTS facilities with the short characteristics and the field of utilization will be described.

*SVC - Static VAR Compensator*

Static compensators of reactive power are electronic devices combined with reactive elements (reactor, capacitor). Their power is regulated by two anti-parallel connected thyristors (see Fig. 1). In case of reactor, this can be phase-controlled or just switched

by a fixed number of the periods. The second manner is not continuous but an advantageous because it does not generate higher harmonics. The reactor is constructed without a ferromagnetic core due to warming by higher harmonics. Similarly, the power capacitor can be switched, which can be connected by a mechanical switch. From the point of view of connecting the VAR compensator to the net, it is a parallel connection. The time-waveform of phase current during one half-period of supply voltage is depicted in Fig. 1c.



Obr. 1. Priebeh fázového prúdu v uvedenom zapojení je vo všeobecnosti neharmonický, [1]

Fig. 1. The current waveform in mentioned connection is in general non-harmonic one, [1]

ing one half-period of supply voltage is depicted in Fig. 1c.

By neglecting passive resistance, it's possible to present the relation for dependency of current magnitude of fundamental harmonic on control angle:

$$I_1(\alpha) = \sqrt{6} \cdot (U/Z) [1 - 2\alpha/\pi - \sin(2\alpha/\pi)]$$

Static VAR compensators are operated in different versions. In most of the cases it involves combinations of power switching elements with an inductor or capacitor:

- Thyristor controlled reactor (TCR)
- Thyristor switched capacitor (TSC)
- Thyristor switched reactor (TSR)
- Mechanically switched capacitor (MSC)

Static VAR compensators can be used for the following types of tasks:

- dynamic voltage stabilization, higher energy transmission ability, higher voltage harmonics decreasing,
- synchronous stability improvement, better dynamic stability, better attenuation of system,
- dynamic load compensation,
- balance the voltage to margins of static operation.

*TCSC - Thyristor Controlled Serial Capacitor*

The devices consist of a power capacitor clamped by the thyristor-controlled inductor or reactor, respectively. The metal oxide

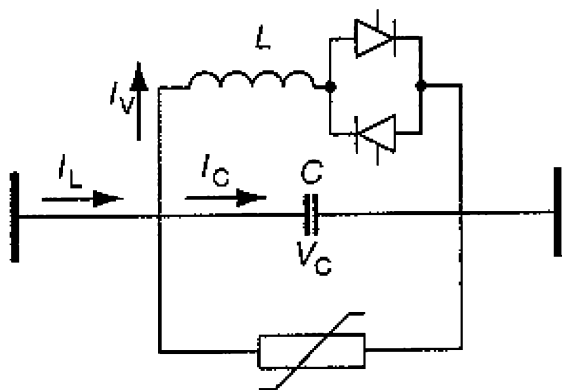
cím prepätiam sa používa ochrana varistorom MOV (*Metal Oxid Varistor*). V tomto prípade ide vlastne o sériový VAR kompenzátor. Zariadenie TCSC dokáže riadiť aj činný výkon v prenosovom vedení a tiež sa používa na tlmenie elektromechanických oscilácií. Pre tlmiace účinky platí nasledovné:

- efektívnosť TCSC sa pri riadení kývania výkonu zosilňuje s veľkosťou prenášaného výkonu,
- účinky tlmenia v prenose sú nezávislé od miesta inštalácie,
- účinky tlmenia nie sú ovplyvňované záťažovou charakteristikou.

Zapojenie sériového VAR kompenzátora je na obr. 2.

*Statický synchrónny kompenzátor (STATCOM - Static Synchronous Compensator)*

Statický synchrónny kompenzátor pracuje podobne ako rotačný synchrónny kompenzátor: – dodáva alebo odoberá zo siete reaktívny výkon základnej harmonickej. Pozostáva z napäťového striedača napájaného z kondenzátorovej batérie, prevodového transformátora s rozptylovou filtračnou indukčnosťou (obr. 3), ako aj z príslušného riadiaceho podsystemu. Výstupný prúd kompenzátora má približne sinusový priebeh a je posunutý za napätím o  $90^\circ$  el. V dôsledku toho môže dodávať alebo odoberať zo siete reaktívny výkon základnej harmonickej. Veľkosť odoberaného, resp. dodávaného je možné regulovať použitím vhodného typu ŠIM-modulácie napäťového striedača.



Obr. 2. Zapojenie sériového VAR kompenzátora  
Fig. 2. Basic connection of serial VAR compensator

STATCOM je vlastne SVC kompenzátorom v oveľa „ľahšom“, menej rozmernom vyhotovení a s minimálnou možnou reakčnou dobou. Jeho reakcia je takmer okamžitá, bez oneskorenia, v nasledujúcej perióde vzorkovania. Podrobnejší opis spôsobu riadenia a filtrovania výstupného prúdu je uvedený v ďalšej kapitole.

STATCOM môže pracovať v nasledujúcich režimoch:

- dynamická stabilizácia napätia, väčšie možnosti prenosu výkonu, menšie kolísanie napätia,
- zlepšenie synchrónnej stability, vyššia dynamická stabilita, lepšie tlmenie sústav,
- dynamické vyrovňovanie záťaže,

varistor (MOV) is used as protection against switching voltages. In this case, it is a serial connection of static VAR compensator.

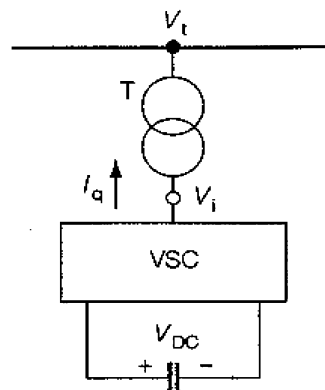
TCSC devices provide to control the active power of transmission lines and it usually serves to attenuation of electromagnetic oscillations. For attenuate effects apply the following:

- effectiveness of TCSC is increasing during the control with transmitted power,
- attenuate effects in transmission are independent of the installation place,
- attenuate effects are not influenced by load curve.

The scheme of connection of serial VAR compensator is shown in Fig. 2.

*STATCOM - static synchronous compensator*

Static synchronous compensator works similarly as rotary synchronous compensator: – deliver or regenerate reactive power of fundamental harmonic to or from supply network. It consists of voltage source inverter supplied from capacitor battery, coupling transformer with leaking filtering inductance (Fig. 3) as well as of corresponding control subsystem. The output current of it is similar to sinusoidal shape and it is shifted by voltage 90 degrees. Consequently, it can deliver or withdraw reactive power of fundamental harmonic from the network. Using a suitable type of PWM-modulation of the voltage inverter can control the value of the delivered or withdrawn reactive power.



Obr. 3. Základné zapojenie kompenzátora STATCOM  
Fig. 3. Basic connection of STATCOM compensator

STATCOM is indeed a static VAR compensator but a much more smaller one with minimum reaction time. Its acting is almost instantaneous without delay in the next period of sampling. More detailed description of the operation, control and filtering of output current is given in the next chapter.

STATCOM can run in following regimes:

- dynamic voltage stabilization, higher energy transmission possibilities, less voltage fluctuation,
- synchronous stability improvement, higher dynamic stability, better attenuation of system,
- dynamic load compensation,
- balancing of the voltage to margins of static operation.

- zlepšenie kvality dodávanej elektrickej energie,
- udržanie napätia v stacionárnom stave,

*Statický sériový kompenzátor (SSSC - Static Synchronous Serial Compensator)*

Statický sériový kompenzátor sa svojim zapojením líši od predchádzajúceho tým, že napäťový striedač je v tomto prípade pripojený k sieti cez „prúdový“ sériovo zapojený transformátor, obr. 4. Na krytie energetických strát striedača je kondenzátorová batéria, dobíjaná zo zvláštného zdroja. Keďže v princípe je SSSC určený na kompenzáciu iba reaktívneho výkonu, dobíjaci zdroj je malý. Pri kompenzáci sa mení veľkosť napätia vytváraného kompenzátorom, pričom jeho vektor je kolmý k vektoru napätia siete. Zariadenie je vlastne náhradou sériového plynulo riadeného kondenzátora a cievky s tým rozdielom, že výstupné napätie SSSC môže byť riadené nezávisle od napätia siete.

SSSC je vhodný pre rovnaké úlohy ako regulačný sériový kompenzátor, totiž pre dynamické riadenie toku výkonu, ako aj pre zlepšovanie napäťovej a uhlovej stability. Skutočnosť, že SSSC môže dodávať prenosovej sústave tak kapacitné ako aj induktívne napätie, zväčšuje oblasť prevádzky prístroja. Z hľadiska regulácie je možné SSSC použiť tak na zvyšovanie ako aj na znižovanie toku výkonu. V oblasti stability umožňuje tlmiť elektromechanické kmitanie efektívnejšie ako sériový kondenzátor.

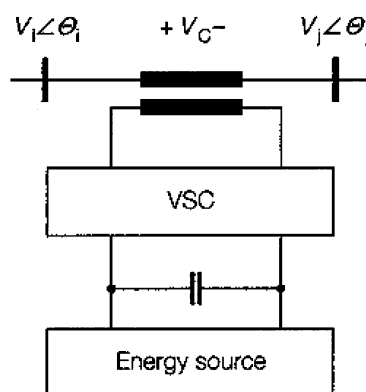
*Univerzálny regulátor toku výkonu (UPFC - Unified Power Flow Controller)*

Zapojenie univerzálného regulátora toku výkonu je na obr. 5. Zariadenie pozostáva z dvoch výkonových meničov, prepojených spoločným jednosmerným medziobvodom a pripojených k sieti cez prevodové transformátory (parallelne a sériovo). Hlavnou úlohou meniča 2 je riadiť výstupné napätie prenosovej sústavy a tým aj výstupný výkon. Základnou úlohou meniča 1 je udržiavať rovnováhu činného výkonu v jednosmernom medziobvode oboch meničov. Okrem toho môže dodávať a odoberať zo siete reaktívny výkon tým, že reguluje napätia na vstupných pripojniciach.

Výkonový regulátor UPFC môže teda riadiť súčasne činný a jalový výkon. Vo všeobecnosti má tri regulačné veličiny a môže byť prevádzkovaný v rôznych druhoch prevádzky. V princípe môže výkonový regulátor UPFC realizovať funkciu iných opísaných

*SSSC - static synchronous serial compensator*

The scheme of the static serial compensator differs from the previous one by connecting to the network via "current" serial transformer, as shown in Fig. 4. To cover energetic losses the capacitor battery has to be charged from the separate source. Due to compensation of reactive power the charging source is small. The value of the voltage generated by compensator during the operation changes whereas the voltage vector is vertical to the network voltage vector. The apparatus is indeed a substitute of the serial controlled capacitor and inductor since the output voltage of SSSC can be controlled independently on network voltage.



Obr. 4. Principiálne zapojenie sériového synchronného kompenzátoru

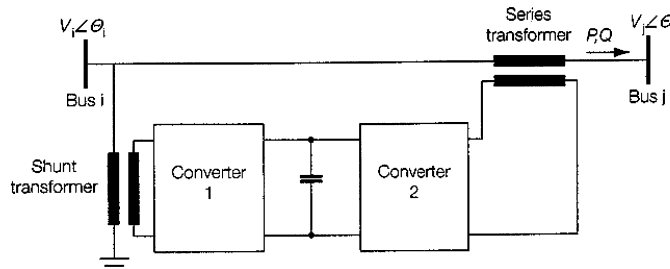
Fig. 4. Basic connection of serial synchronous compensator

SSSC is applicable for the same tasks as the regulation serial compensator, namely for dynamic power flow control as for voltage and angle stability improvement. The fact that SSSC can produce both active and reactive voltage enlarges the operating area

of the device. In relation to control it is possible to use SSSC both for increasing and decreasing the power flow. Concerning the stability, it can attenuate electromechanical oscillations more effectively as a serial capacitor.

*UPFC - Unified power factor controller*

The basic connection of this device is depicted in Fig. 5. It consists of two powerful semiconductor converters interconnected by a DC link, and connected to the line via coupling a serial- and parallel transformer.



Obr. 5. Zapojenie univerzálného regulátora toku výkonu UPFC

Fig. 5. Basic connection of unified power flow controller UPFC

The main task of converter 2 is to control the output voltage of transmission lines and also output power. The basic task of converter 1 is to balance the active power in the DC link of the converters. Besides, it can also generate and withdraw the reactive power from and into the

network by voltage controlling of the input lines.

UPFC can vary both active and reactive power at the same time. Generally it has three regulated quantities, and it can be operated in different operation states. Parallel-connected converter controls input bus bar voltage (Fig. 5), while serial-connected converter controls the active and reactive power or active power and voltage in serial connected node. In principle UPFC could execute

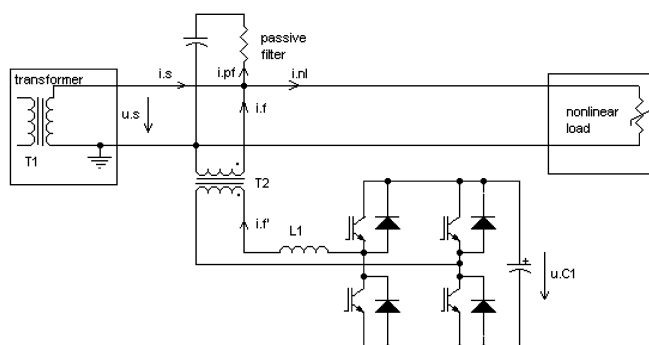
FACTS zariadení, a to udržanie napätia, riadenie toku výkonu a zlepšenie stability.

### 3. Výkonové aktívne filtre v elektrickej trakcii [8], [18], [20], [23], [25]-[26], [28]

Ako sme už uviedli v úvode hlavnými problémami v elektrickej trakcii z hľadiska spolupráce s energetickou napájacou sústavou sú: kompenzácia základnej harmonickej (jalového výkonu), vyšších harmonických zložiek (deformačného výkonu) a čiastočne zvýšenie elektromagnetickej kompatibility EMC.

Ukazuje sa, že najvýhodnejším kompenzačným a filtračným zariadením je paralelný výkonový aktívny filter (PAF-*Power Active Filter*). V jednofázovom zapojení je schopný plniť aj funkciu filtra, funkciu kompenzátora účinníka základnej harmonickej a aj prostriedku na zvýšenie elektromagnetickej kompatibility. Pri viacfázových systémoch je výhodné použiť viacfázový aktívny filter, ktorý dokáže riešiť aj problematiku symetrizovania nesymetrických záťaží. Zapojenie jednofázového paralelného aktívneho filtra je na obr. 6.

Pretože zatiaľ nie je možné navrhnuť a skonštruovať výkonový aktívny filter, ktorý by pracoval priamo s napätím 25 kV, ktoré sa používa v elektrickej trakcii, je schéma doplnená o znižovací väzobný transformátor T2, pomocou ktorého sa filter pripojí k trakčnej sústave. Výstupné napätie transformátora je potrebné voliť s ohľadom na napäťové dispozície použitých polovodičových prvkov.



Obr. 6. Schéma zapojenia jednofázového paralelného aktívneho filtra  
Fig. 6. Scheme of connection of single-phase parallel active filter

the function of other FACTS devices, namely voltage stabilization, power flow control and stability improvement.

### 3. Power Active Filters in Electric Traction [8], [18], [20], [23], [25]-[26], [28]

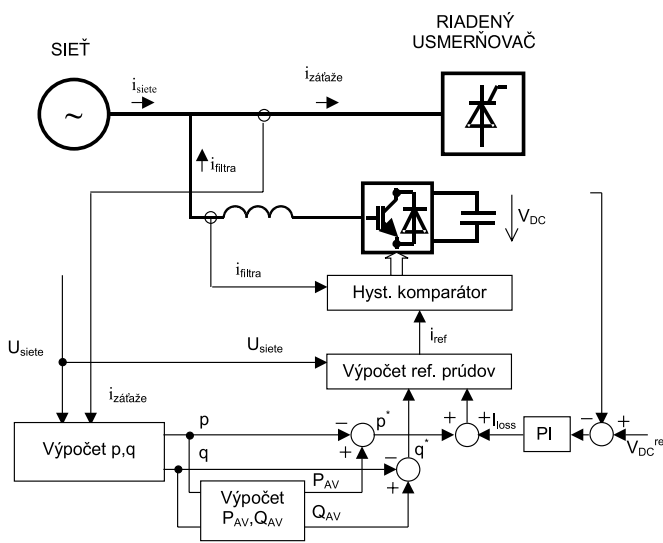
As mentioned above the main problems in electric traction – from point of view of cooperation with an energetic power supply system – are: compensation of fundamental- and higher harmonics (i.e. of reactive- and distortion power), and electromagnetic compatibility increasing.

It seems that the most suitable means for compensation and filtration is parallel active filter PAF. It is, in a single-phase connection, possible to provide the functions of the filter, the compensator of power factor of basic harmonic and also the means of electromagnetic compatibility increasing. In contrast, in multi-phase systems it is suitable to use a multi-phase active filter, which can solve the problematic symmetrization of non-symmetrical and non-linear loads. The connection of a single-phase parallel active filter is shown in Fig. 6.

Since it is not possible to design and build a power active filter for voltage of 25 kV, used in electric traction, step-down coupling transformer T2 completes the scheme. With the help of the power active filter it is connected to traction power supply system. Output voltage of the transformer should be chosen regarding to voltage withstand the power semiconductor devices.

Použitá stratégia riadenia aktívneho filtra – kompenzátora jalového a deformačného výkonu

Na určenie najdôležitejšej radiacej veličiny – referenčného prúdu paralelného aktívneho filtra je možné použiť rôzne metódy riešenia, napr. metódu harmonickej analýzy, okamihového činného a jalového výkonu (tzv.  $p-q$  metóda) ako aj metódu určujúcu referenčný prúd na základe 1. harmonickej prúdu záťaže pomocou strednej hodnoty činného výkonu. Použitie uvedených metód vedie v podstate k rovnakým výsledkom, takže ďalej je opísaná  $p-q$  metóda, ktorá umožňuje



Obr. 7. Celková bloková schéma riadiaceho systému pri použití  $p-q$  metódy  
Fig. 7. Total block scheme of control system using  $p-q$  method

Strategy used for control of an active filter.

For determining the most important control quantity of parallel active filter – its reference current – the methods of the Fourier harmonic analysis, instantaneous reactive and active power, and average value of active power can be used. Application of the methods mentioned above give nearly the same results, so only the method making possible the separated compensation of reactive and distortion power will be described next. The

oddelenú kompenzáciu deformačného a jalového výkonu. Celková bloková schéma riadiaceho systému je na obr. 7.

V prvej fáze výpočtu sú namerané hodnoty sieťového prúdu a napätia transformované do  $\alpha$ - $\beta$  ortogonálneho systému pomocou nasledujúcich transformačných rovníc (pre jednofázový systém):

$$u_{\alpha} = u(t), \text{ resp. } u_{\beta} = \left(u - \frac{T}{4}\right)$$

a podobne:

$$i_{\alpha} = i(t), \text{ resp. } i_{\beta} = i\left(t - \frac{T}{4}\right)$$

Ďalej sú tieto transformované veličiny použité pre výpočet reálnej a imaginárnej zložky okamihového výkonu v  $\alpha$ - $\beta$  ortogonálnom systéme podľa vzťahov:

$$p = u_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + u_{\beta} \cdot i_{\beta} \quad p = P_{AV} + p_{AC}$$

$$q = u_{\alpha} \cdot i_{\beta} - u_{\beta} \cdot i_{\alpha} \quad q = Q_{AV} + q_{AC}$$

Reálna -  $p$  ako aj imaginárna  $q$  - zložka okamihového výkonu záťaže obsahujú jednosmerné ( $P_{AV}$  a  $Q_{AV}$ ) a striedavé ( $p_{AC}$  a  $q_{AC}$ ) zložky. Pritom jednosmerné zložky sú ekvivalentné činnému výkonu, resp. jalovému výkonu 1. harmonickej, striedavé zložky sú ekvivalentné vyšším harmonickým zložkám.

V prípade, že chceme, aby výkonový aktívny filter pracoval iba ako filter vyšších harmonických je potrebné, pre výpočet referenčného prúdu, oddeliť jednosmerné zložky výkonu -  $P_{AV}$  a  $Q_{AV}$ . Výkonový aktívny filter bude potom pracovať vo funkcii kompenzátora deformačného výkonu.

V prípade kompenzácie iba jalového výkonu záťaže je potrebné oddeliť jednosmernú reálnu zložku  $P_{AV}$  a obe striedavé zložky výkonu  $p_{AC}$  a  $q_{AC}$ . Výkonový aktívny filter bude teraz pracovať ako statický synchronný kompenzátor (STATCOM), opísaný v predchádzajúcej kapitole.

Pre kompenzáciu deformačného aj jalového výkonu súčasne postačuje oddelenie iba jednosmernej reálnej zložky  $P_{AV}$  výkonu. Aktívny filter by teraz pracoval aj ako kompenzátor základnej harmonickej a aj ako filter vyšších harmonických. Problémom však je vyhotoviť výkonový polovodičový menič, dimenzovaný na veľký kompenzačný výkon základnej harmonickej (rádovo MVA), ktorý by súčasne spínaním vysokou frekvenciou vytváral kompenzačný prúd vyšších harmonických zložiek (rádovo desiatky kHz). V tomto prípade sa uplatní riešenie aktívneho filtra s distribuovaným výkonom a decentralizovaným riadením.

Na oddelenie jednosmerných zložiek môžu byť využité rôzne techniky, napr. Butterworthov dolnopriepustný filter vyšších rádov, metóda kľazového priemeru a pod. Po oddelení jednosmerných a striedavých zložiek, v závislosti od požadovanej funkcie aktívneho filtra, celkový referenčný prúd paralelného aktívneho filtra je vypočítaný podľa vzťahu:

$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (u_{\alpha} \cdot p_{AC} - u_{\beta} \cdot q_{AC})$$

block scheme of the control system for computing is given in Fig. 7.

At first the measured values of the source voltage and load current are transformed into an  $\alpha$ - $\beta$  orthogonal system using the following transformation equations (for single-phase system):

$$u_{\alpha} = u(t), \text{ and } u_{\beta} = \left(u - \frac{T}{4}\right), \text{ respectively.}$$

and similarly:

$$i_{\alpha} = i(t), \text{ and } i_{\beta} = i\left(t - \frac{T}{4}\right), \text{ respectively.}$$

Then the transformed quantities are used for determining the real and imaginary components of the power in  $\alpha$ - $\beta$  system of co-ordinates, by the following relations:

$$p = u_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + u_{\beta} \cdot i_{\beta} \quad p = P_{AV} + p_{AC}$$

$$q = u_{\alpha} \cdot i_{\beta} - u_{\beta} \cdot i_{\alpha} \quad q = Q_{AV} + q_{AC}$$

where the real and imaginary parts of power consist of DC ( $P_{AV}$  and  $Q_{AV}$ ) and AC components ( $p_{AC}$  and  $q_{AC}$ ).

DC components are equivalent to active and reactive power, respectively. Similarly, the AC components are equivalent to higher harmonics.

In the case of compensation of the distortion load's power the PAF will be operating as a higher harmonics filter. Then both DC-components  $P_{AV}$  and  $Q_{AV}$  should be separated from the total power.

In the case of compensation of reactive load's power it is necessary to separate the DC real component ( $P_{AV}$ ) and both AC components ( $p_{AC}$  and  $q_{AC}$ ). Now, the PAF will be acting as the static synchronous compensator STATCOM described in the previous chapter.

For simultaneous compensation of both distortion and reactive power the separation of the DC component  $P_{AV}$  is sufficient. Thus, the PAF will be operating as a compensator of the fundamental harmonic and filter of higher harmonics. However, the problem is to build such a power semiconductor converter rated for big reactive power of fundamental harmonic (ordered MVAR) at high switching frequency (ordered kHz) to create compensation current of higher harmonics. In this case, the good technical solution presents an active filter with distributed power and decentralized control.

Different techniques can be used for DC components separation, such as Butterworth low-pass filtering, moving average method, etc. After separation of DC- and AC components in regard to the demanded function of PAF, the total reference current can be calculated by the relation:

$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (u_{\alpha} \cdot p_{AC} - u_{\beta} \cdot q_{AC})$$



pre kompenzáciu iba deformačného výkonu, alebo:

$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (-u_{\beta} \cdot Q_{AC})$$

pre kompenzáciu iba jalového výkonu záťaže, resp.:

$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (u_{\alpha} \cdot p_{AC} - u_{\beta} \cdot q)$$

pre kompenzáciu deformačného a jalového výkonu, pričom  $D$  je determinant sústavy.

K celkovému referenčnému prúdu je potrebné pripočítať ešte činnú harmonickú zložku  $i_{loss}$ , ktorá slúži na pokrytie strát vznikajúcich v silovej časti meniča. Na určenie amplitúdy tohoto harmonického prúdu sa dá s výhodou použiť PI-regulátor jednosmerného napätia meniča.

Výkonové meniče využívané v oblasti výkonových aktívnych filtrov pracujú na princípe periodických zapínaní jednotlivých polovodičových prvkov. Táto skutočnosť spôsobuje, že výsledný výstupný prúd výkonového aktívneho filtra obsahuje okrem základnej zložky aj zložku vysokofrekvenčnú, ktorej frekvencia je úmerná spinacej frekvencii celého výkonového aktívneho filtra. Superponovaná VF zložka môže ďalej spôsobiť problémy funkčného, ekonomického ako aj legislatívneho charakteru. Preto je vhodné pri aplikáciách ako sú výkonové aktívne filtre použiť výstupný filtračný článok, ktorý zamedzí prieniku nosného kmitočtu do siete. Tento pasívny filter na výstupe PAF filtruje vyššie harmonické zložky v okolí spinacej frekvencie aktívneho filtra. Na odfiltrovanie nosnej zložky môžu byť použité rôzne typy filtračných obvodov, napr. sériový rezonančný obvod naladený na základnú frekvenciu siete pripojený do série s meničom, sériový rezonančný obvod naladený na nosný kmitočet pripojený paralelne k meniču, ďalej filtračný článok typu  $\Gamma$  alebo  $T$ , resp. filtračný článok zložitejšej typológie.

Pre praktické využitie sa javí ako najvhodnejší filtračný článok typu  $\Gamma$ . Všeobecná schéma zapojenia filtračného článku je na obr. 8.

Filter typu  $\Gamma$  predstavuje neselektívnu zadrž pre nosný kmitočet a čiastočný skrat pre nosný kmitočet a jeho vyššie harmonické násobky. Vo väčšine prípadov návrhu sa kmitočtová doména rozdeľuje na dve hodnoty, pracovný kmitočet meniča (50 resp. 60 Hz) a kmitočet nosný. Tento je pri výkonových aktívnych filtroch obmedzený predovšetkým spinacím stratovým výkon na polovodičových súčiastkach a v praktických aplikáciách zriedka presahuje 5 – 10 kHz (platí nepriama úmernosť medzi výkonom meniča a jeho spinacou frekvenciou). Z hľadiska výstupného filtračného článku je potom výhodnejšia vyššia spinacia frekvencia, pretože sa v takomto prípade dá dosiahnuť lepší stupeň filtrácie výstupného prúdu, pri súčasnom menšom rozmere prvkov filtračného člena, predovšetkým cievok. Úbytok napätia s nosnou spinacou frekvenciou (95 – 98 %) zadržiava tlmivka  $L_2$ , pričom pracovný prúd spôsobuje iba malý úbytok napätia do 10 %. Kondenzátorom  $C_2$  tečie hlavne prúd s nosným kmitočtom obmedzený tlmivkou  $L_2$ , takže výstupné napätie tohoto kmitočtu môže byť obmedzené na hodnotu len niekoľko percent napätia vstupného. Výkon takéhoto filtračného

for compensation of distortion power, or:

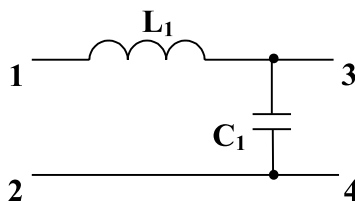
$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (-u_{\beta} \cdot Q_{AC})$$

for compensation of reactive load's power, and finally:

$$i_{ref}(t) = \frac{1}{D} \cdot (u_{\alpha} \cdot p_{AC} - u_{\beta} \cdot q)$$

for compensation of both distortion and reactive power, whereas  $D$  is the determinant of the system.

For computation of total reference current it should be added that the real harmonic component  $i_{loss}$ , which covers the losses generated by the power part of the PAF converter. The magnitude of this current can be determined advantageously using PI controller of DC voltage of the converter.



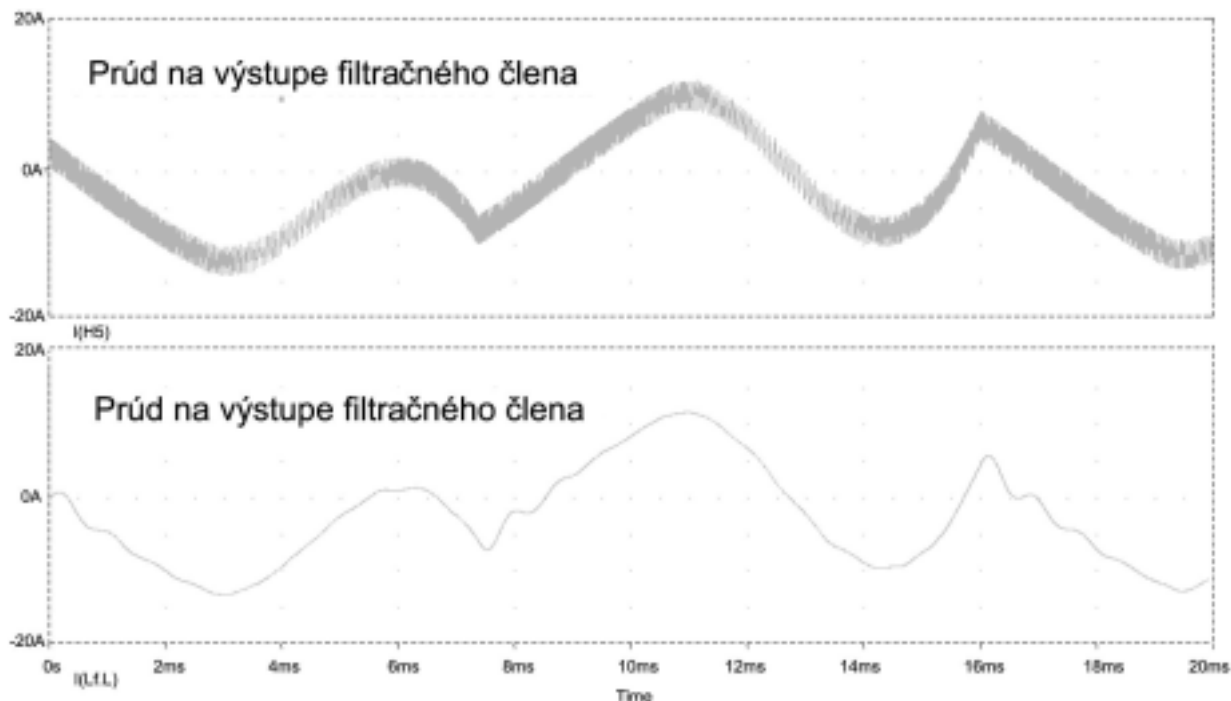
Obr. 8. Filtračný článok typu  $\Gamma$   
Fig. 8. Filter circuit of type of  $\Gamma$

Power semiconductor converters used in field of power active filters operate based on periodically switching semiconductor elements. This fact causes that resulted output current of PAF contains besides the basic RF component. Its frequency is proportional to the switching frequency of PAF. This RF component can also cause problems of function, economic, and legislative character. Therefore, for applications such as power active filters, it is useful to apply filtering of an output signal, which restricts penetration of switching frequency into network. A different type of passive filter circuits can be used for separating the carrier component such as a serial resonant circuit tuned in to a fundamental frequency, parallel resonant circuit tuned in to a switching frequency, filter circuit of type  $\Gamma$  or  $T$ , and many other topologies. For practice application it seems that the filter circuit of type of  $\Gamma$  is most suitable. The general scheme of the connection of filter circuit is shown in Fig. 8.

$\Gamma$ -type of the filter circuit presents a non-selective trap for carrier frequency and a partial short circuit for the carrier frequency, and its higher harmonic multiplies. In most of the applications the frequency domain is divided into two values, working frequency of converter (50 or 60 Hz) and carrier frequency. Regarding the active power filters, this frequency is at first limited by switching power losses on semiconductor elements, and in practical applications rarely exceeds 15 – 20 kHz (inverse ratio between converter power and switching frequency). In terms of the output filter circuit, the higher switching frequency is preferable, because in this case it is the higher filtering level of output current possible besides smaller dimensions of elements and coils. A voltage drop of carrier frequency (95 – 98 %) is restricted by coil  $L_2$ , while the working current causes only a small voltage drop of up to 10 %. Through capacitor  $C_2$  the current flows of carrying frequency limited by inductor  $L_2$ , so the output voltage of this frequency can be limited to several percent points of input voltage. The power of such a filter circuit might only be 5 – 10 %

článku môže byť iba 5 – 10 %, celkového výkonu aktívneho filtra, pričom straty dosahujú 1 – 5 % výkonu meniča. Priebeh výstupného prúdu aktívneho filtra pred a po filtrácii je na obr. 9.

of the general active filter power, while the losses are 1 – 5 % of converter power. Waveform of PAF-output current before and after filtering is shown in Fig. 9.



Obr. 9. Priebeh výstupného prúdu aktívneho filtra pred a po filtrácii  
Fig. 9. Waveform of PAF-output current before- and after filtering

#### 4. Perspektívy zvyšovania efektívnosti prenosu elektrickej energie

Proces reštrukturalizácie priemyslu, zmena vlastníckych vzťahov a prechod na trhovú ekonomiku prináša so sebou aj nový pohľad na otázky dostatočnosti a kvality elektrickej energie. Otázka dostatku elektrickej energie je čoraz ťažšie riešiteľná cestou extenzívneho budovania nových prenosových vedení a výrobní elektrickej energie. Požiadavky vlastníkov pozemkov, ochranných organizácií a v neposlednej miere aj verejná mienka núti prevádzkovateľov prenosových systémov minimalizovať výstavbu nových prenosových vedení a efektívnejšie využívať existujúce prenosové cesty pre prenos dostatočného množstva elektrickej energie k spotrebiteľovi.

Aj tieto dôvody viedli EPRI - Electric Power Research Institute v USA k tomu, aby sponzoroval výskumný program orientovaný na pružné prenosové systémy FACTS (výskum a vývoj technického riešenia a programového zabezpečenia), [11], [24].

Softvérový výskumný program obsahuje vývoj matematických a analytických modelov riadiacich jednotiek zariadení FACTS. Modely sú obsahom súboru simulačných programov EPRI. Tento balík je využívaný na simuláciu možných aplikácií zariadení FACTS v prenosových systémoch. Výsledky týchto simulácií ukazujú na možné zvýšenie prenosových schopností vedení v závislosti od konfigurácií, alebo prenosových obmedzení. Niektoré výsledky

#### 4. Perspectives in Electric Energy Transmission Effectiveness Increasing

The process of industry restructures, changes in property ownership and transition to a direct market economic system inspires new points of view on electric energy sufficiency and quality questions. The question of sufficiency of electric energy is solved with more difficulties because the extensive construct of new transmission lines and power plants. Land owner requirements, protection organizations and last, but not least, public opinion force operators of transmission lines to minimum building of new transmission lines and to use existing corridors for a sufficient value of electric energy transmission.

Those reasons have also led the EPRI - Electric Power Research Institute to a sponsorship of research oriented on the flexible transmission systems FACTS (research and evaluation of software and hardware), [11], [24].

The software research program contains mathematical and analytic models evaluation for FACTS devices control units. EPRI simulation programs contain those models. This package is used for simulation of possible FACTS devices applications. The simulation results suggest the probable line transmission abilities increasing in dependence on configuration or transmission limits.

výskumného programu boli použité na zvýšenie prenosových schopností troch prenosových systémov v USA:

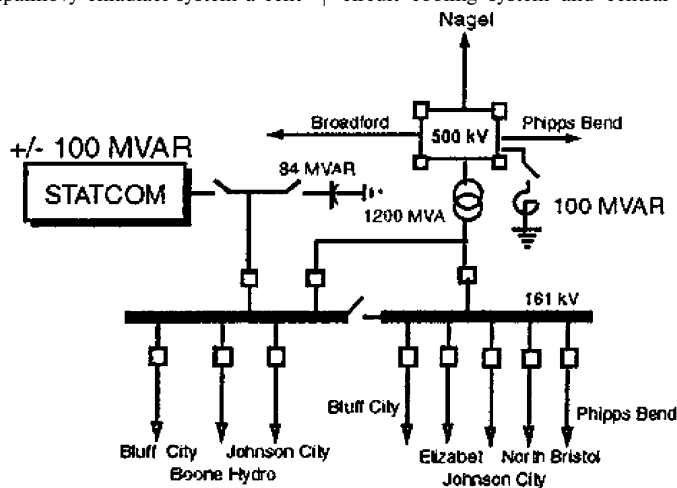
- zvýšenie výkonu prenosového vedenia na juhozápade USA z 300 MW na 400 MW,
- zvýšenie výkonu vedení medzi juhom USA a Floridou z 3400 MW na 4100 MW,
- zvýšenie výkonu vedení do New York City z 2600 MW na 3200 MW.

Technické riešenia výskumného programu sa týkajú vývoja riadiacich jednotiek pre *FACTS*, ktoré umožňujú dynamické riadenie prenosových parametrov vedení: impedancie vedenia, napätia prípojnic a fázového uhla. Výsledky tohto programu sú:

- tyristorovo riadený sériový kondenzátor (*TCSC*) riadi impedanciu vedenia 208 MVAR v elektrickej stanici *Slatt*,
- statický kompenzátor *STATCOM* pre riadenie napätia v elektrickej stanici *Sullivan* s výkonom  $\pm 100$  MVAR,
- výkonový regulátor typu *UPFC* pre riadenie komplexných parametrov prenosu (napätia, impedancie, fázového uhla a toku výkonov) v elektrickej stanici *Inez* s výkonom  $\pm 160$  MVA paralelne a  $\pm 160$  MVA sériovo, podľa zapojenia meničov,
- pružný viacfunkčný kompenzátor (*CSC - Convertible Static Compensator*)  $\pm 200$  MVA v elektrickej stanici *Marcy*.

Pre ilustráciu uvádzame niektoré technické podrobnosti elektrickej stanice *Sullivan*, nachádzajúcej sa v severovýchodnej časti štátu Tennessee. Je napájaná z rozsiahlej elektrickej siete 500 kV a cez štyri 161 kV vedenia, ktoré sú pripojené cez 1,2 MVA transformátor. Zo stanice sú napájaní siedmi distribútori elektrickej energie a jeden veľký priemyselný odberateľ (obr. 10). Zariadenie *FACTS* - statický synchronný kompenzátor *STATCOM* - inštalované v tejto elektrickej stanici, pracuje s výkonom  $\pm 100$  MVAR. Kompenzátor má nasledovné hlavné časti: 48-impulzový dvojúrovňový napäťový menič, kombinovaný s ôsmimi trojfázovými meničmi v mostovom 6-impulzovom zapojení (každý s nominálnym výkonom 12,5 MVA), jednoduchý znižovací transformátor so sekundárnym vinutím hviezda/trojuholník na pripojenie meničov k 161 kV vedeniu, uzavretý kvapalinový chladiaci systém a centrálny riadiaci systém. Celé zariadenie je umiestnené v hale s rozmermi  $27,4 \times 15,2$  m.

Zmenou veľkosti dodávaného, resp. odoberaného reaktívneho výkonu môže kompenzátor *STATCOM* regulovať napätie na prípojniciach 161 kV. Po uvedení zariadenia do prevádzky sa zredukovalo prepínanie odbočiek transformátora z 250 prepnutí za mesiac na 2 až 5 za mesiac. Okrem toho zariadenie môže pripínať kapacitnú batériu, s celkovým reaktívnym výkonom 84 MVAR. Toto sa využíva hlavne v zimnom období.



Obr. 10. Schéma zapojenia elektrickej stanice Sullivan  
Fig. 10. Scheme of connection of electric station Sullivan

Some of the results have been used to increase transmission abilities of three transmission systems in the United States:

- transmission line power increasing in southwestern United States from 300 MW to 400 MW,
- transmission lines power increasing between southern United States and Florida from 3400 MW to 4100 MW,
- transmission lines power increasing to New York City from 2600 MW to 3200 MW.

The hardware program evaluates control units for *FACTS*, which allows dynamic control of transmission line parameters: line impedance, buses voltage and phase angle.

The results are as follows:

- Thyristor controlled serial compensator (*TCSC*), which controls the 208 MVAR line impedance at electric station *Slatt*,
- *STATCOM* compensator for voltage control at electric station *Sullivan* with  $\pm 100$  MVAR,
- *UPFC* type power regulator for complex parameters control (voltage, impedance, phase angle and of power flow) at electric station *Inez* with  $\pm 160$  MVAR parallel and 160 MVAR serial, by the connection of the converters,
- flexible multifunctional compensator (*CSC - Convertible Static Compensator*)  $\pm 200$  MVA at electric station *Marcy*.

For illustrations we can refer to some of the technical details at the electric station *Sullivan* of the TVA Company, which is in the northeast territory of the state of Tennessee. It is supplied from a wide power network 500 kV through four 161 kV lines, which are connected through a 1.2 MVA transformer. From the station seven distributors and a large industrial demand are connected (Fig. 10).

*FACTS* device installed in this electric station ( $\pm 100$  MVAR) consists of the following main parts: 48-pulse two-level voltage converter combined with eight six-pulse three-phase bridge-circuit converters (12,5 MVA each), simply reducing transformer with Y/delta secondary winding to connect to 161 kV line, closed-circuit cooling system and central control system. The whole device is situated in  $27,4 \times 15,2$  m size hall.

Static synchronous compensator *STATCOM* adjusts the voltage on 161 kV buses by changing the generated reactive power. After activating the device the activity of the transformer switch was reduced to 2 - 5 times in the month out of 250 before. Besides, this device can switch 84 MVAR capacitor batteries to the network, making use in winter months.

Ako je z uvedeného prehľadu vidieť, prenosy elektrickej energie sa budú zrejme v budúcnosti uberať cestou nasadenia progresívnych technológií *FACTS*, ktoré dokážu podstatne zvýšiť prenosové schopnosti existujúcich prenosových vedení bez potreby investovania do výstavby nových. V súčasnosti sa stáva nasadenie týchto zariadení už iba otázkou ekonomickou a finančnou, technické prednosti boli už dostatočne preukázané.

As it is possible to see, electric energy transmission will probably follow the direction of *FACTS* progressive technologies in the future, which are able to increase the essential transmission capacity of existing transmission lines without any need to invest in constructing new ones. Thus, the onset of the mentioned devices remains a financial and economic dilemma since the technical benefits have already been sufficiently arguable.

## 5. Literatúra – References

- [1] DOBRUCKÝ, B., KAREV, A. V.: *Static VAR Compensator with Inductor on its DC Link Side* (in Slovak). Power Electronics (Výkonová elektronika) Bulletin, 1979, No. 1, pp. 6–10
- [2] DOBRUCKÝ, B.: *Self-Controlling Properties of Current Source Inverter with Compensation of Reactive Energy of the Load* (in Slovak). Power Electronics (Výkonová elektronika) Bulletin, 1986, No. 11, pp. 1–9
- [3] ANWANDER, E., KLOSS, A.: *75 Years of ABB Power Electronics* (in German). Asea Brown Boveri, Turgi (CH), 1988, pp. 2–11
- [4] BAADER, U., DEPENBROCK, M., GIERSE, G.: *Direct Self Control of Inverter-Fed Induction Machine: A Basis for Speed Control without Speed Measurement*. Proc. of IEEE-IAS Annual Meeting, 1989, pp. 486–492
- [5] OFFRINGA, L. J. J., de JAGER, W. A. G., van OVERBEEKE, F.: *Modelling and Control of 4-Quadrant Pulse Modulated Line-Side Converter for 25 kV, 50 Hz - Supplied Traction Equipment*. Proc. of European EPE '91 Conf., Firenze, 1991, pp. 100–110
- [6] YANG, B., ZELAYA-de la PARRA, H., TAUFIG, J. A.: *Transient Study of a Single-Phase Pulse Converter (SPPC) with a VSI-IM Traction Drive Load*. Proc. of European EPE '91 Conf., Firenze, 1991, pp. 550–555
- [7] CASCONI, V., MANTICA, L., OBERTI, M.: *Three Level Inverter DSC Control Strategies for Traction Drives*. Proc. of European EPE'91 Conf., Firenze, 1991, pp. 4.094–4.098
- [8] AKAGI, H.: *New Trends in Active Filters* (Keynote paper). Proc. of European EPE '95 Conf., Vol. 0, Sevilla (ES), Sept. 1995, pp. 0.017–0.026
- [9] CHALOUPKA, F.: *4-Quadrant Drive with Pulse Converter and DSC of Induction Motor* (in Czech). PhD Thesis, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina (SK), July 1995, pp. of 267
- [10] GOEKE, T., GRETSCH, R., PESTKA, J., SCHNEIDER, J., WECK, K. H., WELLSOW, W. H.: *Central Compensation of Harmonics – Legal Aspects, System Requirements and Technical Solution*. Proc. of CIGRÉ, Vol. 36, Paris (FR), 1996, pp. 304
- [11] WILDBERGER, A. M.: *Complex Adaptive Systems – Concepts and Power Industry Applications*. IEEE Control Systems, Vol. 17, No. 6, Dec. 1997, s. 77–88
- [12] DOBRUCKÝ, B., KYRÄ, J., RÁČEK, V., HUKEL, M., DUBOVSKÝ, J.: *Improvement of Performance of 4Q Converter using Unidirectional DC Link Inductor*. Proc. of European EPE '97 Conf., Vol. 4, Trondheim (NOR), Sept. 1997, pp. 4.465–4.469
- [13] RÁČEK, V., DOBRUCKÝ, B., VITTEK, J., POKORNÝ, M.: *Time-Suboptimal Analysis and Control of Fast Three-Phase Active Filter Acting in 1/6 of Period*. Proc. of IEEE-APEC '98 Conf., Vol. 2, Anaheim CA (USA), Feb. 1998, pp. 979–985
- [14] KARA, A., AMHOF, D., DAEHLER, P., GRUENING, H.: *Power Supply Quality Improvement with a Dynamic Voltage Restorer*. Proc. of IEEE-APEC '98 Conf., Vol. 2, Anaheim CA (USA), Feb. 1998, pp. 986–993
- [15] HAVRILA, R., MAKAROVIC, J.: *New Technologies of Unfavourable Influence Decreasing in Electrified Systems* (in Slovak). Textbook, Institute of Continuing Learning, University of Žilina (SK), March 1998
- [16] DOBRUCKÝ, B., KUCER, P., ALEXÍK, M.: *Fuzzy Control of AC Traction Drives*. ElectroMotion 5 (1998), No. 2, 2. Q/1998, pp. 65–74
- [17] DOBRUCKÝ, B., POKORNÝ, M.: *Dynamic Compensation of Three-Phase Symmetrical System Using Clarke Orthogonal Transform*. Proc. of EM '98 Conf. on Energy Management, Dubrovnik (CRO), May 1998, pp. 100–105
- [18] ALTUS, J., DOBRUCKÝ, B.: *Conjunction of Power Electronics, Electroenergetics and Electric Traction in 21st Century* (in Slovak). Proc. of Conf. "Trends of Economic Development of SR", Tr. Teplice (SK), July 1998, pp. 45–48
- [19] JOZEFÁK, L.: *Direct Torque Control of Induction Motor with Predictive Type of Filter* (in Slovak). PhD Thesis, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina (SK), Dec. 1998
- [20] DOBRUCKÝ, B., OTČENÁŠOVÁ, A., POKORNÝ, M., TABÁČEK, R.: *The New Possibilities of Dynamic Compensation and Regeneration of Energy in Electric Traction*. Communications – Scientific Letters of University of Žilina, No. 1, 1.Q/1999, pp.
- [21] GRUENBAUM, R., NOROOZIAN, M., THORVALDSON, B.: *FACTS – Powerful Systems for Flexible Energy Transmission* (in German). ABB Technik, May 1999, pp. 4–17
- [22] WESTERMANN, D., RAHMANI, M., GUAY, J.: *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*. Proc. of ELEKTRO '99 Conf., Vol. of Electrical Engineering, University of Žilina (SK), May 1999, pp. 1–15, 169–194 – 6 papers
- [23] DOBRUCKÝ, B., POKORNÝ, M., RÁČEK, V., HAVRILA, R.: *A New Method of the Instantaneous Reactive Power Determination for Single-Phase Power Electronic Systems*. Proc. of European EPE '99 Conf., Lausanne (CH), Sept. 1999, pp. (CD-ROM)
- [24] EDRIS, A.: *FACTS Technology Development: An Update*. IEEE Power Eng. Review, March 2000, pp. 4–9

- [25] ROCH, M., CABAJ, P., JANOUŠEK, L.: *Active Filters as a Tool for Electromagnetic Compatibility of Power System Increasing*. Proc. of TELESCON2000 Conf., Dresden (DE), May 2000 - The Best Student Paper Award
- [26] DOBRUCKÝ, B., POKORNÝ, M., JANOUŠEK, L., ROCH, M.: *Power Supply Quality Enhancement using Active Filters and Energy Storage Means*. Thematic Project Proposal for FP5 EU Programme, V 7.00, EF ŽU Žilina, prepared in July 2000
- [27] DOBRUCKÝ, B., JOZEFÁK, L., ROŠKO, P.: *Application of Kalman- and Extended Kalman Filter in Direct Torque Control of Induction Motor Drive*. Proc. of PEMC 2000 Conf., Vol. 6, Košice (SK), Sept. 2000, pp. (CD-ROM)
- [28] RÁČEK, V. et al.: *High Harmonics Elimination and Power Factor Compensation in 25 kV/50 Hz Traction Power Supply Network* (in Slovak). Research report No. EU 725/00, University of Trenčín & Electrical Research and Testing Institute, N. Dubnica (SK), Sept. 2000