

## 1. DISPOSITIVI FACTS

### 1.1 Introduzione

I dispositivi FACTS (Sistemi di Trasmissione Flessibili in AC) non rappresentano di per sé una innovazione concettuale, ma il più moderno sviluppo, reso possibile dai progressi dell'elettronica di potenza, dei compensatori elettromeccanici, come:

- i trasformatori a rapporto complesso (detti anche Phase Shifting Transformer, PST)
- i condensatori e reattori con variazione a gradino.

In effetti negli scorsi decenni, lo sviluppo dell'elettronica di potenza ha reso possibile il progetto di dispositivi, come tiristori e diodi GTO ad elevate prestazioni, adatti a sistemi di alta tensione. Come risultato, i dispositivi FACTS hanno un tempo di risposta valutato nell'ordine dei 100 *ms*, e si prestano alla realizzazione di sistemi di controllo estremamente veloci. A questo riguardo si può richiamare l'attenzione sul fatto che i trasformatori PST, hanno un'azione di controllo piuttosto lenta a causa della lentezza nella commutazione elettromeccanica dei variatori di rapporto. L'alternativa tra un compensatore di tipo convenzionale e uno innovativo è dettata dalla rapidità dei fenomeni da controllare, vale a dire:

- nel caso di fenomeni lenti, come per es. i sovraccarichi termici delle linee, si può fare uso dei compensatori descritti precedentemente e cioè dei PST
- invece, per fenomeni rapidi, come per es. i transitori elettromeccanici, si può fare ricorso ai dispositivi FACTS.

In altri termini, si può affermare che, mediante i FACTS, i convenzionali dispositivi di commutazione elettromeccanici vengono sostituiti da tiristori, ottenendo trasformatori a rapporto variabile statici, PST statici e condensatori statici.

Ci sono molti tipi di dispositivi FACTS.

Prescindendo dalla velocità di risposta e dalla possibilità di effettuare un'azione di controllo continua, i FACTS si presentano come la realizzazione dei compensatori tradizionali mediante l'elettronica di potenza. Verranno qui trattati i dispositivi FACTS che aggiungono nuove potenzialità ai compensatori convenzionali. In particolare:

- a. *Il compensatore statico di potenza reattiva* (Static Var Compensator, SVC): connesso in derivazione, il compensatore statico di potenza reattiva genera o assorbe potenza reattiva per il controllo della tensione nodale.
- b. *Il compensatore sincrono statico* (Static Synchronous Compensator, SSC, Static Compensator, STATCOM) detto anche *condensatore sincrono statico* (Static Condenser, STATCON) o *generatore statico di potenza reattiva*. Questi sono dispositivi statici connessi in derivazione, i quali funzionano senza richiedere energia dall'esterno e sono in grado di assorbire correnti capacitive e/o induttive e in tal modo generano o assorbono potenza reattiva.
- c. *Il compensatore serie controllato da Tiristori* (Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC): compensatore con reattanza capacitiva composto da una serie di banchi capacitivi in parallelo con un reattore controllato a tiristori; ha lo scopo di fornire una reattanza serie variabile.
- d. *Il compensatore serie di tipo avanzato* (Advanced Series Compensator, ASC): compensatore con connessione in serie e tensione di uscita in quadratura, e controllabile indipendentemente dalla corrente di linea; ha lo scopo di incrementare o diminuire la caduta di tensione reattiva attraverso la linea e in tal modo di controllare la potenza trasmessa.
- e. *Il controllore di potenza unificato* (Unified Power Flow Controller, UPFC): una combinazione di STATCOM e compensatore serie accoppiati mediante collegamento in corrente continua per fornire simultaneamente compensazione serie attiva e reattiva, come pure regolazione della tensione nodale.

I successivi paragrafi saranno focalizzati sui tipi di FACTS precedentemente elencati e soprattutto sui UPFC che, come detto, dispongono di tutte le funzioni.

## **1.2 Compensatori statici di potenza reattiva**

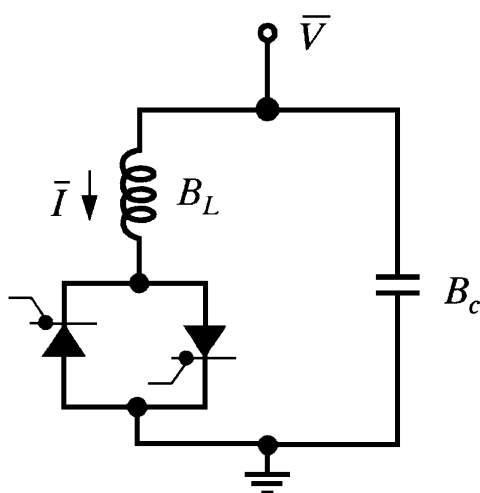
### ***Principi di funzionamento***

I compensatori statici di potenza reattiva sono dispositivi completamente statici che possono assorbire o generare potenza reattiva in modo variabile anche molto velocemente. Come conseguenza, a differenza dei condensatori e reattori, possono effettivamente regolare la tensione come i generatori e i compensatori sincroni.

L'impiego più diffuso di questi dispositivi è lungo le linee lunghe ad alta tensione per il controllo delle tensioni nei sistemi di trasmissione permettendo la trasmissione al di là di distanze relativamente lunghe, sia in condizioni statiche che perturbate.

In particolare è necessario ricordare che gli SVC possono fornire compensazione in derivazione tanto induttiva quanto capacitiva a seconda che il flusso di potenza sia minore o maggiore della potenza caratteristica.

Gli SVC sono caratterizzati da un controllo rapido e continuo della tensione (con tempi di risposta nell'intervallo tra 30 – 100 ms) e sono composti da banchi di condensatori con capacità modulabile per mezzo di tiristori (detti TSC) connessi in parallelo a reattori controllati con tiristori (detti TCR). Lo schema di principio dell'SVC è mostrato in figura 1



**Figura 1** Schema base di reattore controllato con tiristore TCR.

Il suo funzionamento tipico consiste nel far variare la corrente  $\bar{I}$  tra un minimo e massimo controllando l'angolo d'innesco dei tiristori.

Si può pensare questa variazione come analoga a quella che potrebbe essere ottenuta attraverso una variazione della suscettanza  $B_L$  del reattore

$$B_{min} \leq B_L \leq B_{max}$$

La figura 2 a) mostra la caratteristica tensione - potenza reattiva assorbita in condizioni di regime stazionario.

Se un banco di condensatori, con una suscettanza costante  $B_c$  è collegato in parallelo a un reattore come riportato in figura 1, allora la caratteristica statica fissata diventa quella riportata in figura 2 b); cioè diventa possibile l'erogazione di una potenza reattiva.

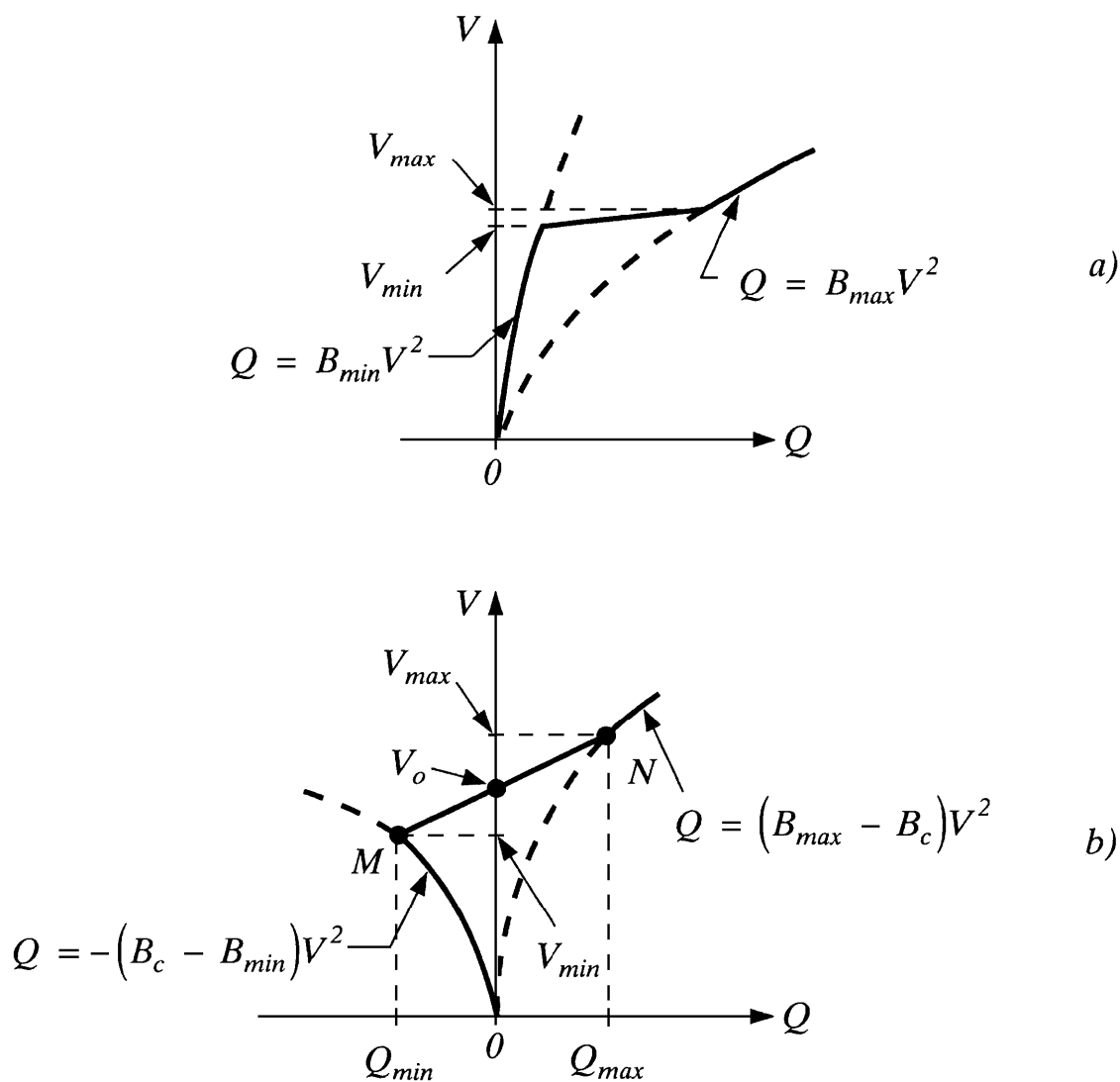


Figura: 2 Caratteristiche statiche tensione - potenza reattiva con un TCR.

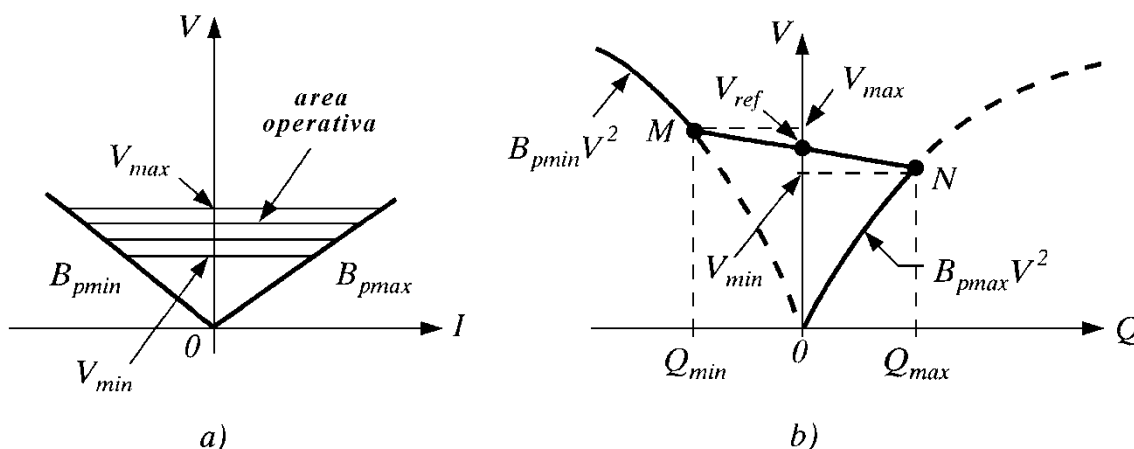
**Suscettanza equivalente e caratteristica in regime stazionario**

L'SVC agisce in modo analogo se i condensatori controllati mediante tiristori sono inclusi nel ramo capacitivo della figura 1. Essi pertanto corrispondono a una suscettanza variabile collegata elettricamente al nodo; la suscettanza equivalente complessiva è data da:

$$B_p = B_c + B_L$$

con

$$\begin{cases} B_c > 0 \\ B_L < 0 \end{cases}$$



**Figura: 3** Caratteristiche statiche di un SVC.

La suscettanza equivalente può variare nell'intervallo:

$$B_{pmin} \leq B_p \leq B_{pmax}$$

assumendo valori induttivi ( $B_{pmin} < 0$ ) oppure capacitivi ( $B_{pmax} > 0$ ). La caratteristica di regime nel piano ( $V, I$ ) è mostrata in figura 3 a), dove  $I$  è la corrente assunta positiva se erogata dall'SVC. La figura 3 b), mostra invece la caratteristica stazionaria nel piano ( $V, Q$ ), dove  $Q$  è la potenza reattiva iniettata nella rete. L'area di funzionamento normale è rappresentata dal segmento  $\overline{MN}$  fin tanto che la potenza assorbita o erogata dal compensatore varia nell'intervallo compreso tra  $Q_{max}$  e  $Q_{min}$

$$\begin{cases} Q_{max} = B_{pmax} V^2 \\ Q_{min} = B_{pmin} V^2 \end{cases}$$

La tensione  $V$  è regolata all'interno dell'intervallo tra  $V_{max}$  e  $V_{min}$ . Fuori da questo intervallo il compensatore agisce come un reattore o un condensatore ossia:

$$\begin{cases} Q = B_{pmax} V^2 & \text{per } V < V_{min} \\ Q = B_{pmin} V^2 & \text{per } V > V_{max} \end{cases}$$

Invece, per

$$V_{min} < V < V_{max}$$

l'equazione del segmento  $\overline{MN}$  fornisce la seguente caratteristica della tensione regolata:

$$V = V_{ref} - \frac{V_{max} - V_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} Q$$

L'inclinazione della retta  $\overline{MN}$  della caratteristica a regime e la sua intersezione con l'asse delle ordinate, cioè il valore di tensione  $V_{ref}$  corrispondente al valore nullo della potenza reattiva, sono determinate dal controllo dell'angolo d'innescò del tiristore che può essere fatto variare all'interno di un intervallo abbastanza ampio. In particolare è possibile ottenere l'inclinazione nulla e un  $V_{ref}$  uguale alla tensione nominale del nodo al quale è connesso il compensatore. Come conseguenza la tensione a regime risulta costante e uguale alla nominale.

Inutile dire, che il regolatore della suscettanza  $B_p$  dovrebbe essere caratterizzato da un'azione di tipo integrale a bassa frequenza.

### **3 Compensatori sincroni statici (STATCOM), Compensatori serie controllati con tiristori (TCSC) e Compensatori serie avanzati (ASC)**

#### **STATCOM**

Questi dispositivi rappresentano un'evoluzione degli SVC: il compensatore agisce come un generatore di tensione connesso al nodo AC per mezzo di un trasformatore di disaccoppiamento con reattanza  $x_{tp}$ , come mostrato in figura 4.

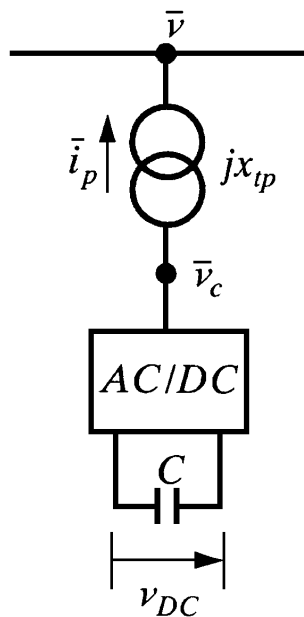
Partendo dalla tensione continua  $v_{DC}$  ai morsetti del condensatore, che funziona come un generatore di tensione continua, il convertitore AC/DC, mediante l'impiego di GTO, fornisce una tensione  $\bar{v}_c$  controllabile in ampiezza e in fase.

Anche in questo caso, la rappresentazione equivalente è quella del generatore di corrente di compensazione  $\bar{i}_p$ :

$$\bar{i}_p = \frac{(\bar{v}_c - \bar{v})}{jx_{tp}}$$

La variabile controllata è la tensione  $\bar{v}_c$ , la cui fase è mantenuta uguale a quella di  $\bar{v}$ , mentre l'ampiezza può variare nell'intervallo:

$$v_{cmin} \leq v_c \leq v_{cmax}$$



**Figura: 4 Schema base di uno STATCOM.**

### *Compensatori serie controllati con tiristori (TCSC)*

Sono costituiti da banchi di condensatori con interruttori statici in parallelo con reattori controllati da tiristori.

Il compensatore agisce come una reattanza variabile in serie con la linea di trasmissione compensata. La reattanza complessiva:

$$x_s = \frac{x_c x_L}{x_c + x_L}$$

Permette di realizzare la compensazione serie della tensione in base alla formula:

$$\bar{v}_s = jx_s \bar{i}$$

### **Compensatori serie avanzati (ASC)**

Questi compensatori agiscono come un generatore di tensione connesso alla linea di trasmissione per mezzo di un trasformatore con una reattanza  $x_t$  e con avvolgimento primario collegato in serie, mostrato in figura 5.

Come nel caso degli STATCOM c'è un convertitore AC/DC con una tensione  $v_c$  di cui si possono controllare l'ampiezza e la fase.

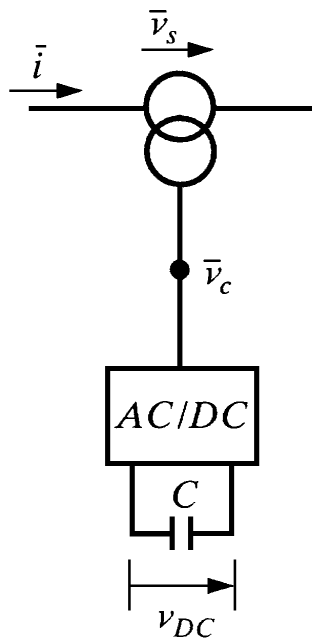
Il circuito equivalente è caratterizzato dalle seguenti equazioni:

$$\bar{v}_s = \bar{v}_c - jx_t \bar{i}$$

La fase di  $\bar{v}_c$  è mantenuta in quadratura con la corrente di linea  $\bar{i}$ , mentre l'ampiezza è proporzionale alla stessa corrente. Di conseguenza la prima delle equazioni precedenti diventa:

$$\bar{v}_s = jk\bar{i} - jx_t \bar{i} = jk_s \bar{i}$$

Così,  $k_s > 0$  dà luogo ad una compensazione capacitiva e  $k_s < 0$  ad una compensazione induttiva.



**Figura: 5** Schema base di un ASC.

Questi compensatori sono analoghi al TCSC.



Tuttavia essi realizzano la compensazione senza l'impiego di condensatori direttamente collegati con la linea di trasmissione; in questo modo si evitano i problemi di risonanza di tipo serie con l'induttanza della linea.

#### 4 Controllore di potenza unificato UPFC

Questo compensatore sfrutta il concetto di compensazione tipico sia dei dispositivi in derivazione e sia di quelli in serie. L'UPFC può essere considerato come la combinazione di uno STATCOM e di un ASC; esso impiega convertitori GTO con un condensatore che agisce come generatore ideale di tensione continua. Lo schema di principio è riportato in figura 6. I due convertitori operano come descritto nei paragrafi precedenti; essi hanno un'ulteriore caratteristica, cioè la possibilità di effettuare il controllo continuo della fase della tensione di compensazione in serie, non necessariamente in quadratura con la corrente di linea.

L'UPFC funziona come un convertitore ideale di potenza nel quale il flusso di potenza attiva può liberamente scorrere in entrambe le direzioni tra i morsetti in corrente alternata dei due convertitori; inoltre tutti e due i convertitori possono generare o assorbire potenza reattiva al terminale di uscita in maniera indipendente.

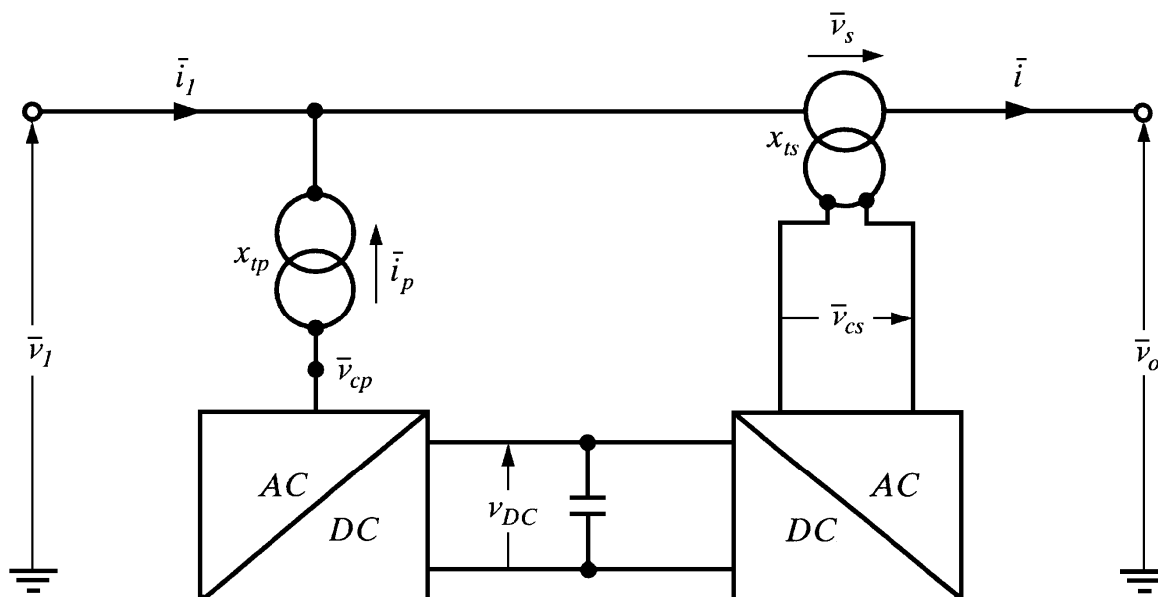
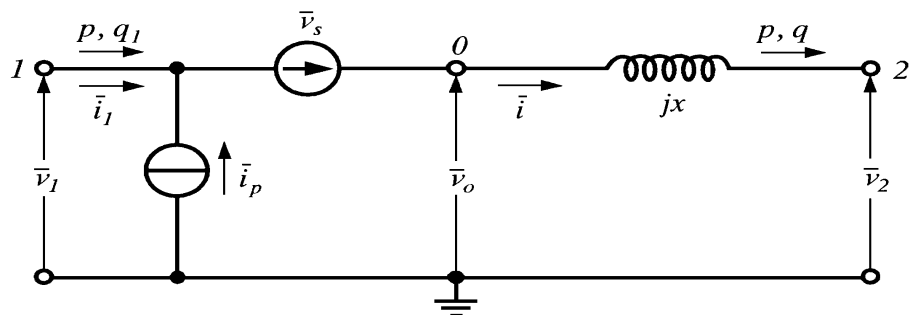


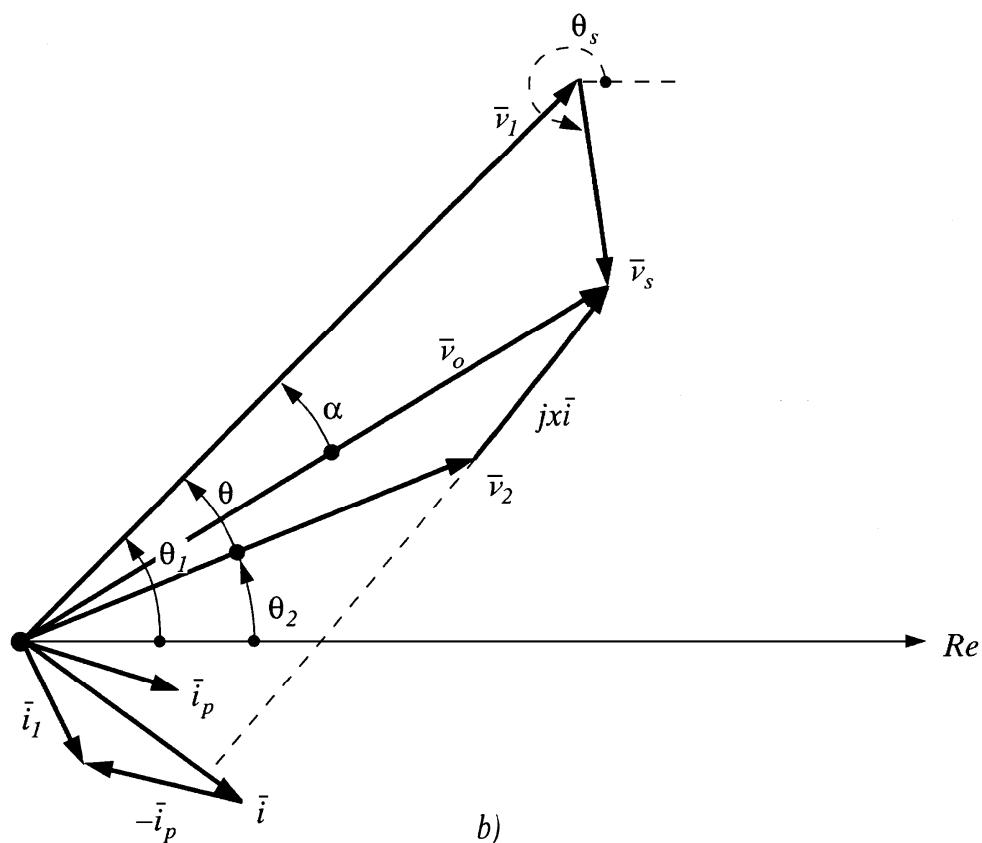
Figura: 6 Schema base di un UPFC.

**Diagramma dei fasori e circuito equivalente**

Il circuito equivalente è quello già a suo tempo considerato per il caso generale. Questo circuito e la linea (di reattanza  $x$ ) sulla quale l'UPFC è installato, sono riportati per convenienza in figura 7.



a)



b)

**Figura: 7** Linea di trasmissione con UPFC, circuito equivalente (a), diagramma fasoriale (b).

Risulta:

$$\begin{cases} \bar{v}_s = \bar{v}_{cs} - j\bar{x}_{ts}\bar{i} \\ \bar{i}_p = \frac{(\bar{v}_{cp} - \bar{v}_l)}{j\bar{x}_{tp}} \end{cases}$$

dove  $\bar{v}_{cs}$  e  $\bar{v}_{cp}$  rappresentano le tensioni controllate.

L'UPFC perciò fornisce una tensione di compensazione serie  $\bar{v}_s$ , la cui ampiezza e fase può essere variata mediante l'azione di controllo dei due compensatori statici. Come nel caso dei trasformatori di regolazione, questa tensione si somma alla tensione di ingresso  $\bar{v}_l$  in modo da produrre la tensione di uscita  $\bar{v}_0$ . Diversamente dal caso del trasformatore, la tensione  $\bar{v}_s$  non dipende da  $\bar{v}_l$  così come la corrente di compensazione  $\bar{i}_p$  non dipende da  $\bar{i}_l$ .

La figura 7 b) riporta il diagramma fasoriale di una linea dotata di un UPFC alla partenza.

L'ampiezza della tensione  $v_s$  e all'angolo  $\alpha$ , sono soggette a limiti tecnici, cioè:

$$0 \leq v_s \leq v_{smax}$$

con

$$v_{smax} = 0.3 - 0.5 \text{ pu}$$

mentre

$$\alpha_{max} = -\alpha_{min} = 30^\circ$$

### ***Controllo del flusso di potenza attiva e reattiva***

Il generatore di tensione  $\bar{v}_s$  inietta la seguente potenza reale nella rete

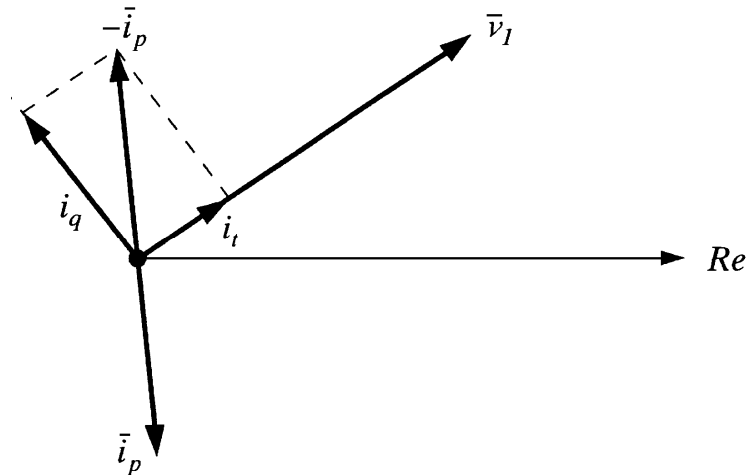
$$p_t = \text{Re} \left\{ \bar{v}_s \bar{i}^* \right\}$$

che uguaglia la potenza assorbita dal generatore di corrente. Infatti se le perdite nell'UPFC sono trascurate in quanto molto piccole, non ci sono sorgenti di energia e neppure consumi all'interno del dispositivo. Indicando con  $\bar{i}_t$  e  $\bar{i}_q$  le componenti in fase e in quadratura, rispetto alla tensione  $\bar{v}_l$ , della corrente di compensazione assorbita  $-\bar{i}_p$ , come mostrato in figura 8:

$$-\bar{i}_p = \bar{i}_t + j\bar{i}_q$$

si ottiene:

$$p_t = \operatorname{Re} \{ \bar{v}_s i^* \} = v_1 i_t$$



**Figura: 8** Diagramma delle componenti di  $-\bar{i}_p$  rispetto a  $\bar{v}_1$ .

Se le perdite della linea (figura 7 a)) sono trascurate, la potenza attiva in corrispondenza del nodo di partenza della linea (nodo  $I$  nella figura) uguaglia quella ricevuta al nodo d'arrivo.

Poiché:

$$\begin{cases} \bar{i} = \frac{\bar{v}_0 - \bar{v}_2}{jx} \\ \bar{v}_0 = \bar{v}_1 + \bar{v}_s \end{cases}$$

e quindi:

$$\bar{i} = \frac{\bar{v}_1 - \bar{v}_2 + \bar{v}_s}{jx}$$

mentre

$$\bar{i}_1 = \bar{i} - \bar{i}_p$$

È particolarmente utile ricavare la potenza complessa in corrispondenza del nodo di arrivo della linea:

$$\bar{s} = \bar{v}_2 \bar{i}^* = j \frac{I}{x} \bar{v}_2 (\bar{v}_1 - \bar{v}_2 + \bar{v}_s)$$

che può essere espressa come somma di due contributi

$$\bar{s} = \bar{s}_b + \bar{s}_a$$

dove

$$\bar{s}_b = j \frac{I}{x} \bar{v}_2 (\bar{v}_1 - \bar{v}_2) \quad (1)$$

è la *potenza base*, cioè la potenza in transito lungo la linea in assenza di UPFC, mentre

$$\bar{s}_a = j \frac{I}{x} \bar{v}_2 \bar{v}_s \quad (2)$$

è la *potenza addizionale* dovuta alla presenza dell'UPFC. Se  $\theta$  indica l'angolo di carico della linea:

$$\theta = \theta_{12}$$

sviluppando l'equazione (1)

$$\bar{s}_b = j \frac{I}{x} (\bar{v}_1 \bar{v}_2 \cos \theta - j \bar{v}_1 \bar{v}_2 \sin \theta - \bar{v}_2^2)$$

altrimenti espressa in termini di potenze attiva e reattiva:

$$\begin{cases} p_b = \frac{\bar{v}_1 \bar{v}_2}{x} \sin \theta \\ q_b = \frac{\bar{v}_2}{x} (-\bar{v}_2 + \bar{v}_1 \cos \theta) \end{cases}$$

si ottengono le solite formule ben note.

Dall'equazione (2), invece si ottiene:

$$\bar{s}_a = j \frac{I}{x} v_2 v_s [\cos(\theta_2 - \theta_s) + j \sin(\theta_2 - \theta_s)]$$

cioè

$$\begin{cases} p_a = \frac{v_2 v_s}{x} \sin(\theta_s - \theta_2) \\ q_a = \frac{v_2 v_s}{x} \cos(\theta_s - \theta_2) \end{cases}$$

Perciò, le potenze complessive ricevute ai morsetti di arrivo della linea assumono i seguenti valori:

$$\begin{cases} p_t = p_b + p_a = \frac{v_1 v_2}{x} \sin \theta + \frac{v_2 v_s}{x} \sin(\theta_s - \theta_2) \\ q_t = q_b + q_a = \frac{v_2}{x} (-v_2 + v_1 \cos \theta) + \frac{v_2 v_s}{x} \cos(\theta_s - \theta_2) \end{cases} \quad (3)$$

Si può notare che le equazioni sopra indicate non dipendono dalla corrente  $\bar{i}_p$  iniettata dal generatore ideale di corrente. Per comprendere l'effetto di  $\bar{v}_s$  sul transito di potenza attiva e reattiva, si possono considerare le due componenti,  $v_{sy}$  e  $v_{sx}$ , che sono rispettivamente in quadratura e in fase con la tensione  $\bar{v}_2$ , come mostrato in figura 9.

$$\begin{cases} v_{sx} = v_s \cos(\theta_s - \theta_2) \\ v_{sy} = v_s \sin(\theta_s - \theta_2) \end{cases}$$

Così al posto dell'equazione (13), si ottiene:

$$\begin{cases} p_t = p_b + p_a = \frac{v_1 v_2}{x} \sin \theta + \frac{v_2 v_{sy}}{x} \\ q_t = q_b + q_a = \frac{v_2}{x} (-v_2 + v_1 \cos \theta) + \frac{v_2 v_{sx}}{x} \end{cases}$$

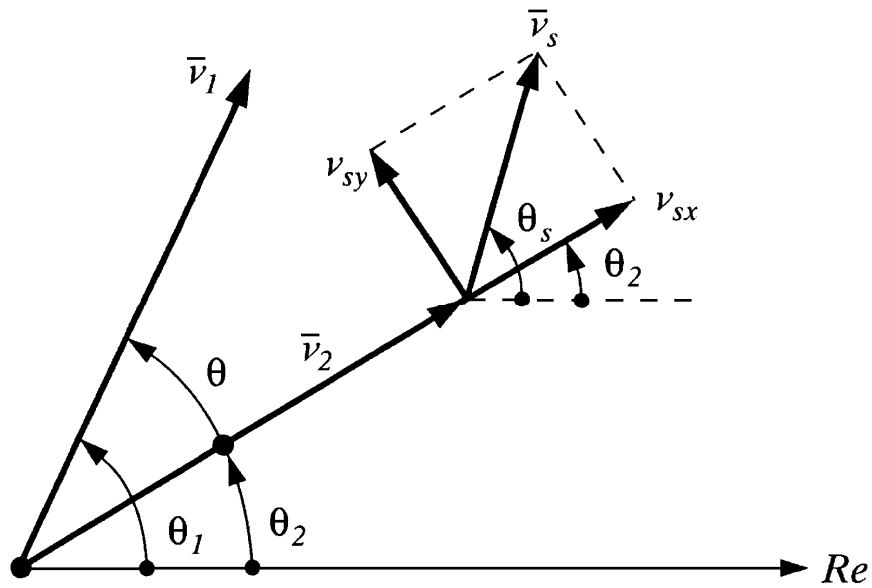


Figura: 9 Diagramma fasoriale delle componenti di  $\bar{v}_s$  rispetto a  $\bar{v}_2$ .

Cioè se risulta:

$$\begin{cases} v_{sy} = 0 \\ v_{sx} \neq 0 \end{cases}$$

solo il flusso della potenza reattiva è controllato.

Se invece è:

$$\begin{cases} v_{sy} \neq 0 \\ v_{sx} = 0 \end{cases}$$

Allora solo il flusso della potenza attiva è controllato. In particolare la potenza attiva è trasmessa anche se risulta  $\theta = 0$ .

Infine, se

$$\begin{cases} v_{sy} \neq 0 \\ v_{sx} \neq 0 \end{cases}$$

entrambi i flussi di potenza attiva o reattiva sono controllati indipendentemente, in quanto  $v_{sx}$  controlla la potenza reattiva e  $v_{sy}$  la potenza attiva.

Naturalmente, se

$$v_{sx} = v_{sy} = v_s = 0$$

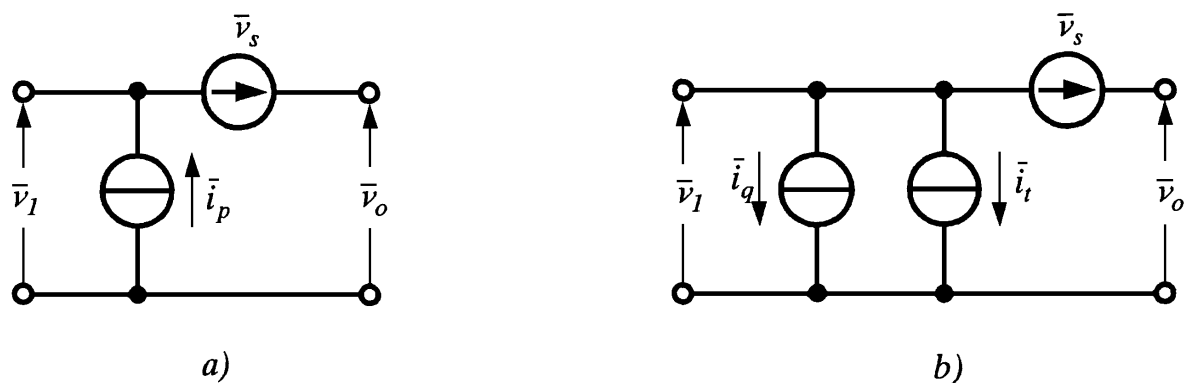
non è possibile operare alcun tipo il controllo.

**Controllo del flusso di potenza attiva, reattiva e della tensione**

Secondo lo schema di controllo precedentemente descritto, il convertitore in derivazione è impiegato solo per il trasferimento della potenza  $p_i$  al convertitore serie e poi al generatore di tensione  $\bar{v}_s$ .

In altri termini nella corrente  $-\bar{i}_p$  è stata usata solo la componente in fase con  $\bar{v}_l$ , come se il convertitore in derivazione operasse con un fattore di potenza unitario: la capacità di compensazione reattiva in derivazione dell'UPFC, per mezzo della componente  $i_q$ , non è stata utilizzata. D'altra parte, si è osservato che il controllo del flusso è indipendente da  $\bar{i}_p$ , almeno per quanto riguarda il secondo estremo della linea dove l'UPFC è installato. La potenza reattiva nel nodo dove il compensatore è installato dipende invece da  $i_q$ .

Il generatore ideale di corrente di figura 7 a può essere sostituito dal parallelo di due generatori ideali con i valori  $\bar{i}_i$  e  $\bar{i}_q$  rispettivamente come mostrato in figura 10 b).



**Figura: 10 Circuiti equivalenti dell'UPFC.**

Poiché il convertitore in derivazione può generare o assorbire potenza reattiva indipendentemente dalla potenza attiva  $p_i$ , l'UPFC può inoltre agire come uno STATCOM o un ASC, regolando così l'ampiezza della tensione  $\bar{v}_l$  (cioè della tensione nel nodo in cui è installato) indipendentemente dal flusso di potenza attiva e reattiva controllato.



Il controllo della tensione è effettuato per mezzo della corrente  $\bar{i}_q$  in quadratura rispetto a  $\bar{v}_l$ , cioè attraverso la componente reattiva della corrente assorbita dal compensatore in derivazione.