# A INFLUÊNCIA DO UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Danilo Basseto do Valle<sup>\*</sup>, Maxwell Martins Menezes<sup>†</sup>, Percival Bueno de Araujo<sup>\*</sup>

\* Av. Brasil, nº 56, CEP 15385-000 Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS - UNESP) Ilha Solteira, SP, Brasil

<sup>†</sup>Rua Getúlio Vargas, nº 2125, CEP 89600-000 Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC) Joaçaba, SC, Brasil

## Emails: danilodovalle@gmail.com, maxwell.menezes@unoesc.edu.br, percival@dee.feis.unesp.br

**Abstract**— The UPFC FACTS device is extremely powerful with regard to management and control of the parameters of the electric power system. Depending on its control strategy this device can take different configurations, thus performing a simultaneous or selective control of the parameters of the transmission network. Acting in the simultaneous setting, the UPFC can control and manage flows of active and reactive power in the transmission line that is installed and also make the control voltage common bus installation. In this paper we present his model of power injection, the structure of the control system and the inclusion of this controller in the Newton-Raphson algorithm. Power flow analyzes are performed on a test system multimachine known as New England. The results are presented and discussed in this work.

Keywords— Dynamic Control, Electric Power System, Power Flow Studies, UPFC.

**Resumo**— O dispositivo FACTS UPFC é extremamente poderoso no que se refere ao controle e gerenciamento dos parâmetros do sistema elétrico de potência. Dependo de sua estratégia de controle esse dispositivo pode assumir diferentes configurações, realizando assim, um controle seletivo ou simultâneo dos parâmetros da rede de transmissão. Atuando na configuração simultânea, o UPFC pode controlar e gerenciar fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão em que está instalado e, além disso, realizar o controle da tensão do barramento comum de instalação. Nesse artigo é apresentado seu modelo de injeção de potência, sua estrutura do sistema de controle e a inclusão desse controlador no algoritmo de Newton-Raphson. Análises de fluxo de potência são realizadas em um sistema teste multimáquinas conhecido como New England. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos no decorrer do trabalho.

Palavras-chave— Controle Dinâmico, Estudo de Fluxo de Potência, Sistema Elétrico de Potência, UPFC.

# 1 Introdução

A aplicação de dispositivos FACTS (Flexible AC Transmission System) no sistema elétrico de potência (SEP) têm se mostrado uma potente solução para os problemas do sistema de transmissão em regiões onde apresentam dificuldades na construção de novas linhas de transmissão. Nesses casos, os controladores FACTS podem evitar e/ou prevenir que os limites operacionais das linhas de transmissão fiquem fora dos valores aceitáveis, sendo assim fundamentais para proteger a integridade dos sistemas de transmissão já existentes. Além disso, os dispositivos FACTS podem dar um rápido suporte de potência reativa ao SEP, devido sua instantânea resposta de controle (quando comparada a resposta da máquina síncrona) e ainda propiciar uma melhora generalizada na estabilidade dinâmica e transitória do sistema (Hingorani, 1999), (Song and Johns, 1999).

A tecnologia FACTS iniciou-se em 1988, quando Hingorani e seu grupo de pesquisa iniciaram os primeiros trabalhos sobre o tema (Hingorani, 1999). Ultimamente com o progresso da eletrônica de alta potência e com a instalação do mais recente dispositivo FACTS, o Convertible Static Compensator (CSC), os dispositivos FACTS de segunda geração como o UPFC (Unified Power Flow Controller), o IPFC (Interline Power Flow Controller) e o GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller) tomaram uma perspectiva mais realista, servindo de motivação para pesquisadores e engenheiros de sistemas de potência (Uzunovic et al., 2001), (Valle et al., 2010), (Valle and Araujo, 2012), (Gyugyi et al., 1995), (Lubis et al., 2011).

Nesse trabalho é apresentado um estudo sobre o controlador UPFC. Esse dispositivo pode ser visto como a combinação de um SSSC (Static Synchonous Series Compensator) com um STATCOM (Static Synchronous Compensator), ambos trabalhando simultaneamente e acoplados via um link CC (Hingorani, 1999), (Song and Johns, 1999). Com essa configuração o UPFC tem a capacidade de fornecer uma compensação série reativa controlável na linha de transmissão que está instalado e, também, controlar a tensão da barra comum de instalação. Adicionalmente, o UPFC torna-se uma opção para a melhoria da estabilidade dinâmica quando equipado com sinais estabilizadores suplementares em sua malha de controle (Valle and Araujo, 2012), (Furini et al., 2011), (Ayres et al., 2010).

A ideia fundamental do presente artigo consiste em apresentar uma modelagem matemática para representar o dispositivo em programas de fluxo de potência, além de apresentar sua inclusão no algoritmo de Newton-Raphson. Análises no tocante ao fluxo de potência foram realizadas em um sistema teste mostrando a eficiência do dispositivo UPFC no que se refere ao controle e gerenciamento dos fluxos de potência do sistema de transmissão e no suporte de potência reativa que pode evitar e/ou prevenir problemas de instabilidade de tensão.

# 2 Modelo de injeção de potência do UPFC

Independentemente se UPFC estar operando na forma simultânea ou seletiva o modelo de injeção de potência desse dispositivo não se modifica, podendo ser escrito de acordo com (Valle and Araujo, 2012). Na Fig. 1, é apresentado o diagrama esquemático do UPFC.



Figura 1: Diagrama esquemático do UPFC.

Na Fig. 1 os conversores são conectados ao sistema elétrico por meio de transformadores de acoplamento. Um dos conversores encontra-se em série com a linha de transmissão i - j, enquanto que o outro encontra-se em derivação com a barra comum i de instalação do dispositivo (Ayres et al., 2010). O circuito equivalente do UPFC está ilustrado na Fig. 2. Nessa figura o conversor série (VSC2) foi representado por uma fonte de tensão síncrona, enquanto que o conversor em derivação (VSC1) foi representado por uma fonte de corrente ideal.



Figura 2: Circuito equivalente do UPFC.

A partir do circuito equivalente do UPFC apresentado na Fig. 2, chega-se às Equações de (1) a (4), que é um modelo alternativo de representação do UPFC no problema de fluxo de potência (Lubis et al., 2011).

$$P_{inj,i} = -rb_{ij}V_iV_jsen(\theta_{ij} + \gamma) \tag{1}$$

$$Q_{inj,i} = -rb_{ij}V_i^2\cos(\gamma) - V_iI_q \tag{2}$$

$$P_{inj,j} = rb_{ij}V_iV_jsen(\theta_{ij} + \gamma) \tag{3}$$

$$Q_{inj,j} = rb_{ij}V_iV_j\cos(\theta_{ij} + \gamma) \tag{4}$$

Nas Equações de (1) a (4),  $\theta_{ij} = (\theta_i - \theta_j)$  e  $b_{ij} = (-1/X_{ij})$ . Seguindo a abordagem realizada em (Huang et al., 2000), onde a tensão  $\bar{V}_s$  foi decomposta em termos da componente de fase  $V_q$  e da componente de quadratura  $V_p$  (Fig. 3 e Equações (5) e (6)), as equações do modelo de injeção de potência do UPFC podem ser reescritas de acordo com as Equações (7) a (10).

$$V_p = -rV_i sen(\gamma) \tag{5}$$

$$V_q = -rV_i cos(\gamma) \tag{6}$$



Figura 3: Diagrama fasorial do UPFC.

$$P_{inj,i} = -V_i b_{ij} [V_p cos(\theta_{ij}) + V_q sen(\theta_{in})]$$
(7)

$$Q_{inj,i} = -V_i b_{ij} V_q - V_i I_q \tag{8}$$

$$P_{inj,i} = V_j b_{ij} [V_p cos(\theta_{ij}) + V_q sen(\theta_{ij})]$$
(9)

$$Q_{inj,i} = V_j b_{ij} [V_q cos(\theta_{ij}) - V_p sen(\theta_{ij})]$$
(10)

De posse dessas equações, se pode representar o dispositivo FACTS UPFC por injeções de potência nas barras  $i \in j$ , como ilustra a Fig. 4.



Figura 4: Representação do modelo de injeção de potência do UPFC.

Essa representação permite incluir facilmente o dispositivo UPFC no algoritmo de Newton-Raphson e, além disso, essa modelagem é compatível com estudos de estabilidade dinâmica e transitória do SEP (Valle and Araujo, 2012).

#### 3 Inclusão do UPFC no Fluxo de Potência

Para incluir o UPFC no algoritmo de Newton-Raphson é necessário fazer com que todos os *mismatches* referentes às potências ativa e reativa sejam satisfeitos. Nas barras onde o controlador UPFC está instalado, os *mismatches* de potência ativa e reativa devem ser assegurados pelas seguintes equações:

$$0 = P_{gn} - P_{inj,n} - P_{li} - P_{calc,n} \tag{11}$$

$$0 = Q_{gn} - Q_{inj,n} - Q_{li} - Q_{calc,n},$$
 (12)

nas quais n = i, j e, desconsiderando as perdas,  $P_{gn} \in Q_{gn}$  são as gerações de potências ativa e reativa.  $P_{li} \in Q_{li}$  são eventuais cargas ativa e reativa na barra comum *i* de instalação.  $P_{calc,n} \in Q_{calc,n}$  são as potências ativa e reativa convencionais transmitidas através das linhas de transmissão. Por fim,  $P_{inj,n} \in Q_{inj,n}$  são as potências ativa e reativa referentes as injeções de potência devido aos conversores do UPFC.

Além de satisfazer os *mismatches* de potência ativa e reativa, deve-se considerar a restrição de invariância de potência ativa do UPFC, a qual assegura que toda a potência ativa fornecida pelo conversor shunt seja exatamente igual à demanda de potência ativa do conversor série. Matematicamente esta restrição é escrita na forma de (13) (Lubis et al., 2011).

$$0 = P_s + P_{sh} \tag{13}$$

Na Equação (13),  $P_s$  é a contribuição de potência ativa do conversor série e  $P_{sh}$  é a contribuição de potência ativa do conversor em derivação. Com essa restrição considerada, um dispositivo UPFC possui apenas três graus de controle livres, sendo eles utilizados para controlar dois fluxos de potência na linha de transmissão que o controlador está instalado (ativo e reativo) e também a tensão da barra onde o conversor shunt está conectado. Os fluxos controlados pelo dispositivo UPFC podem ser obtidos a partir da Fig. 4, realizando o balanço nodal de potência na barra j do sistema. O balanço ativo e reativo é descrito pelas Equações (14) e (15).

$$P_{Lj} = -P_{ji} - P_{inj,j} \tag{14}$$

$$Q_{Lj} = -Q_{ji} - Q_{inj,j} \tag{15}$$

Como será visto na próxima seção, as equações de controle dos fluxos  $(P_{Lj} \in Q_{Lj})$ , servirão de entradas para a estrutura de controle do UPFC. Essas entradas atuarão sobre a componente série e a componente em quadratura da fonte de tensão síncrona que representa o conversor série do UPFC.

#### 3.1 Estrutura do Sistema de Controle do UPFC

A estrutura do sistema de controle do UPFC está ilustrada na Fig. 5. Nessa estrutura, a constante de tempo  $T_m$  representa o atraso do processamento do sistema de controle do UPFC. O ganho proporcional  $K_m$  leva a uma diminuição do erro da tensão do barramento comum de instalação do dispositivo. Já os controladores PI (representados pelos ganhos  $K_1$  e  $K_2$  e pelas constantes de tempo  $T_1$  e  $T_2$ ), eliminam os erros devido ao controle dos fluxos. Sendo assim, com essa estrutura, é possível controlar os fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão em que o UPFC está instalado e também controlar a tensão na barra de instalação do dispositivo.



Figura 5: Estrutura do sistema de controle do UPFC.

Na Fig. 5,  $P_{refj}$  e  $Q_{refj}$  são os valores especificados pelo operador do sistema dos fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão i - j.  $V_{ref}$  é o valor especificado de controle da tensão do barramento de instalação do dispositivo. As Equações (16) a (20) descrevem o comportamento dinâmico do sistema de controle do UPFC e foram obtidas a partir do diagrama de blocos ilustrado na Fig. 5.

$$\dot{V}_p = \frac{K_1}{T_m} (P_{refj} - P_{Lj}) + \frac{1}{T_m} X_1 - \frac{1}{T_m} V_p \qquad (16)$$

$$\dot{X}_1 = \frac{K_1}{T_1} (P_{refj} - P_{Lj})$$
(17)

$$\dot{V}_q = \frac{K_2}{T_m} (Q_{refj} - Q_{Lj}) + \frac{1}{T_m} X_2 - \frac{1}{T_m} V_q \qquad (18)$$

$$\dot{X}_2 = \frac{K_2}{T_2} (Q_{refj} - Q_{Lj})$$
(19)

$$\dot{I}_{q} = \frac{1}{T_{m}} [K_{m} (V_{iref} - V_{i}) - I_{q}]$$
(20)

Baseando-se nas referências (Zhu et al., 2000) e (Kopcak et al., 2007), que tratam da técnica de fluxo de potência expandido, as Equações (16) a (20) foram incluídas no algoritmo de Newton-Raphson. A ferramenta de fluxo de potência expandido considera que as variáveis das Equações (16) a (20) tornam-se constantes em relação ao tempo, ao passo que se reduzem a equações algébricas para um dado ponto de equilíbrio. Dessa forma, o problema fica restrito a encontrar os zeros de um conjunto de funções algébricas não lineares, cuja solução pode ser obtida através de um fluxo de potência convencional.

Após resolver o fluxo de potência, no qual as equações dinâmicas do UPFC (tratadas agora como algébricas) foram incluídas juntamente com as equações algébricas que representam o sistema elétrico, é obtido um panorama completo desse dispositivo, pois a nova matriz Jacobiana, além de possuir todas as informações acerca das variáveis do sistema CA, possui também informações sobre o controlador UPFC.

### 4 Simulações e Resultados

O modelo apresentado foi analisado em um sistema teste multimáquinas composto de 10 geradores, 39 barras e 46 linhas de transmissão, cujo diagrama unifilar é mostrado na Fig. 6. Os geradores foram representados por um modelo de terceira ordem, equipados com Reguladores Automáticos de Tensão de primeira ordem. O sistema elétrico de potência foi modelado pelo Modelo de Sensibilidade de Potência (Deckmann and da Costa, 1994). Todos os dados do sistema podem ser obtidos em (Araujo and Zaneta, 2001).



Figura 6: Diagrama do sistema New England.

Nesse artigo, foram analisados dois casos: (a) instalação do UPFC na barra 38 do SEP (o dispositivo poderá realizar o controle dos fluxos de potência ativa e reativa em uma das linhas de transmissão de interconexão do sistema) e, (b) instalação do UPFC na barra que apresenta o segundo pior nível de tensão do sistema (barra 37). A escolha da instalação do UPFC nas barras 37 e 38 do SEP deve-se ao fato que essas barras estão localizadas próximas a região que apresenta os piores níveis de tensão do sistema (tensões abaixo de 0,95 pu), sendo consideradas barras críticas do sistema. A condição inicial nesse artigo é a situação em que uma barra fictícia  $F_1$ , foi incluída ao sistema. Para cada caso separadamente, entre a barra fictícia e a barra comum de instalação (barras 37 e 38), foi considerada a reatância do transformador de acoplamento série, com valor de 0,01 pu. Em outras palavras, a condição inicial pode ser dita como a situação em que o UPFC está instalado no sistema, porém o mesmo não exerce o controle nem dos fluxos de potência ativa e reativa que pode controlar nem da tensão do barramento de instalação. Na Tab. 1 são apresentados as magnitudes e ângulos de todas as barras deficientes do sistema considerando a condição inicial do caso (a).

Tabela 1: Magnitude e ângulo das barras deficientes do sistema

Barra	Condição inicial do caso (a)		
	Mag. das Tensões	Ang. das Tensões	
12	0.935	-8.258	
14	0.949	-10.100	
15	0.946	-10.607	
33	0.941	-12.302	
34	0.946	-10.804	
36	0.938	-12.608	
37	0.937	-13.278	

Para a condição inicial também são apresentadas as perdas de transmissão e os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão próximas onde o dispositivo UPFC está instalado.

Tabela 2: Fluxos nas linhas de transmissão próximas a instalação do UPFC.

	Condição inicial do caso (a)			(a)
Linha	$P_{km}$	$Q_{km}$	Perdas	Perdas
	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)
$LT_{34-37}$	345.937	50.677	1.098	15.378
$LT_{36-37}$	223.405	-4.822	0.227	2.608
$LT_{37-38}$	46.017	-128.174	0.381	6.006
$LT_{38-10}$	45.637	-100.449	0.039	0.974
$LT_{30-10}$	169.087	-29.978	0.285	7.124

Na Tab. 3 são apresentados os valores das magnitudes e ângulos das tensões de todas as barras deficientes do sistema para duas condições. Na condição 1, os fluxos de potência ativa e reativa foram mantidos iguais aos valores da condição inicial (Tab. 2) e a tensão da barra 38 do sistema foi elevada até que todas as barras deficientes ficassem dentro de uma faixa de operação de  $\pm$ 5% do valor nominal. Já na condição 2, os fluxos de potência ativa e reativa que o UPFC controla  $(LT_{38-10})$  foram incrementados em 30% e 80%, respectivamente. Além disso, para essa condição, a tensão da barra 38 também foi elevada até que todas as barras do sistema ficassem nos valores aceitáveis de operação ( $\pm$  5% do valor nominal).

Para a condição 1, o UPFC forneceu uma potência reativa através de seu conversor em derivação de 208,94 MVAr. Com esse suporte de potência reativa ao sistema, o dispositivo conseguiu elevar o perfil de tensão de todas as barras deficientes para dentro da faixa aceitável de operação (ver condição 1 na Tab. 3).

Observa-se ainda pela Tab. 3, que para a condição 2, o UPFC também conseguiu manter as tensões de todas as barras dentro da faixa Para isso, o controlador UPFC especificada. forneceu ao sistema um suporte de potência reativa de 126,12 MVAr. A quantidade menor de potência reativa fornecida pelo conversor em derivação para a condição 2, deve-se ao fato que o UPFC além de atuar no controle da tensão da barra comum de instalação, também realizou uma compensação série reativa de 80% na linha de transmissão que pode controlar  $(LT_{38-10})$ . Pela Tab. 3, verifica-se que na condição 2 a tensão da barra 38 apresentou um nível mais distante dos limites aceitáveis  $(V_{38} = 1, 09),$ quando comparado com a condição 1. Os fluxos controlados pelo UPFC são mostrados na Tab. 4.

Tabela 3: Magnitude e ângulo das barras deficientes após instalação do UPFC (barra 38).

	Condição 1		Condição 2	
	$V_{38} = 1.086$		$V_{38} = 1.090$	
Barra	Mag. das	Ang. das	Mag. das	Ang. das
	Tensoes	Tensoes	Tensoes	Tensoes
12	0.950	-8.071	0.950	-8.034
14	0.962	-9.843	0.963	-9.763
15	0.954	-10.299	0.954	-10.160
33	0.957	-11.983	0.958	-11.899
34	0.970	-10.566	0.970	-10.557
36	0.969	-12.297	0.971	-12.322
37	0.973	-12.947	0.974	-12.989

Tabela 4: Fluxos nas linhas de transmissão próximas a instalação do UPFC.

	Caso (a) após inclusão do UPFC			
Linha	$P_{km}$	$Q_{km}$	Perdas	Perdas
	(MW)	(MVAr)	(MW)	(MVAr)
$LT_{34-37}$	354.530	-57.957	1.090	15.257
$LT_{36-37}$	230.646	-101.622	0.267	3.066
$LT_{37-38}$	61.819	-332.570	2.489	39.289
$LT_{38-10}$	59.330	-180.810	0.203	5.075
$LT_{30-10}$	155.515	-23.633	0.242	6.044

Como visto na Tab. 4, o dispositivo UPFC controlou os fluxos nos valores especificados pelo operador do sistema, já que  $P_{ref_{38-10}}$  e  $Q_{ref_{38-10}}$ , foram especificados em 0,5933 e -1,8081 pu respectivamente.

Embora todas as barras deficientes do sistema apresentaram magnitudes dentro dos valores aceitáveis de operação após a inclusão do UPFC, a barra 38 de instalação do dispositivo ficou fora dos limites estabelecidos. Como o objetivo principal é que todas as barras ficassem dentro dos limites (incluindo a própria barra de instalação), o controlador UPFC foi instalado na barra 37 de forma a controlar os fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão  $LT_{37-36}$  (ver Fig. 6). Na Tab. 5 é apresentada a condição inicial do caso (b). Essa condição refere-se à inclusão de uma bara fictícia  $F_1$  no SEP, sendo que, entre a barra fictícia e a barra comum de instalação do UPFC é considerada a reatância do transformador de acoplamento série, com valor de 0,01 pu.

Tabela 5: Magnitude e ângulo das barras deficientes do sistema

Barra	Condição inicial do caso (b)		
	Mag. das Tensões	Ang. das Tensões	
12	0.935	-8.277	
15	0.946	-10.669	
33	0.942	-12.369	
34	0.947	-10.888	
36	0.940	-12.234	
37	0.939	-13.780	

Observa-se na Tab. 5, que para a condição inicial do caso (b), seis barras ficaram fora dos limites aceitáveis de operação. Também se pode verificar que a barra 37 possui o segundo pior nível de tensão do sistema. Na Fig. 7 é apresentado como se comporta as magnitudes das tensões apresentadas na Tab. 5 com a atuação do controlador UPFC na barra 37 do SEP (os fluxos de potência ativa e reativa que o UPFC controla foram mantidos iguais aos da condição inicial).



Figura 7: Níveis de tensão do sistema com a atuação do UPFC na barra 37.

Pela Fig. 7, observa-se que quando a tensão da barra 37 atinge o valor de 0,986 pu, todas as barras deficientes do sistema já se encontram dentro dos limites especificados. Para manter a tensão da barra 37 em 0,986 pu o UPFC forneceu através de seu conversor em derivação uma potência de 260,1 MVAr. Se o operador do sistema desejar elevar a tensão da barra comum de instalação em 1,00 pu, seria necessário que o UPFC fornecesse ao sistema um suporte de potência reativa de 342.58 MVAr, ficando o sistema com um perfil de tensão mais adequado, como ilustra a Fig. 7.

## 5 Conclusões

Nesse artigo foi apresentado um modelo de injeção de potência para o UPFC que permite representá-lo em programas de fluxo de potência e fluxo de potência ótimo. Também foi apresentada uma estrutura para o sistema de controle do UPFC que permite realizar estudos tanto de análise dinâmica quanto de análise transitória do SEP. Os resultados obtidos mostram a veracidade tanto do modelo de injecão de potência do UPFC, quanto da estrutura do sistema de controle do dispositivo. Pelas simulações realizadas verificou-se que o dispositivo UPFC foi capaz de controlar e gerenciar de forma adequada os fluxos de potência ativa e reativa na linha de transmissão em que foi instalado e, também, mostrou-se eficaz em controlar a tensão no barramento comum de instalação. Foi visto que o suporte de potência reativa fornecida pelo UPFC foi essencial para melhorar os níveis de tensão do sistema. Constatou-se ainda que quando o dispositivo UPFC atua de forma simultânea no controle da tensão do barramento de instalação e na compensação série reativa sua eficiência é aumentada. Pode-se concluir pelos resultados obtidos que o UPFC é extremamente poderoso no controle e gerenciamento dos parâmetros do SEP, trazendo excelentes benefícios ao sistema e podendo evitar e/ou prevenir problemas que poderiam afetar sua integridade de operação.

# Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pelo suporte financeiro.

## Referências

- Araujo, P. B. and Zaneta, L. C. (2001). Pole placement method using the system matrix transfer function and sparsity, International Journal of Electric Power and System Energy Systems, 23(3): 173–178. DOI: 10.1016/S0142-0615(00)00055-7
- Ayres, H. M., Kopcak, I., Castro, M. S., Milano, F. and da Costa, V. F. (2010). A didactic procedure for designing power oscillation dampers of facts devices, Simulation Modelling Practice and Theory, pp. 896–909. DOI: 10.1016/j.simpat.2010.02.007
- Deckmann, S. M. and da Costa, V. F. (1994). A power sensitivity model for electromechanical oscillation studies, IEEE Transactions on Power Systems, 9(2): 965–971. DOI: 10.1109/59.317649
- Furini, M. A., Pereira, A. L. S. and Araujo, P. B. (2011). Pole placement by coordinated tuning of power system stabilizers and FACTS-POD stabilizers, International

Journal of Electric Power and System Energy Systems, **33**(3): 615–622. DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.12.019

- Gyugyi, L., Rietman, T. R., Edris, A., Schauder, C. D., Torgerson, D. R. and Williams,
  S. L. (1995). The unified powe flow controller: A new approach to power transmission control, IEEE Transactions on Power Delivery, **10**(2): 1085–1097. DOI: 10.1109/61.400878
- Hingorani, S. M. (1999). Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission system, United Kingdom.
- Huang, Z., Ni, Y., Shen, C. M., Wu,
  F. F., Chen, S. and Zhang, B. (2000).
  Application of unified power flow controller in interconnected power systems - modeling, interface, control strategy, and case study, IEEE Transactions on Power Systems, 15(2): 817–824. DOI: 10.1109/59.867179
- Kopcak, I., da Costa, V. F. and da Silva, L. C. P. (2007). A generalized load flow method including the steady state characteristic of damping devices, Proceedings of the IEEE PowerTech 2007.
- Lubis, R. S., Hadi, S. P. and Tumiran (2011). Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow, International Conference on Electrical Engineering and Informatics 2011.
- Song, Y. H. and Johns, A. T. (1999). Flexible AC Transmission Systems (FACTS), The Institute of Electrical Engineers, United Kingdom. DOI: 10.1049/PBPO030E
- Uzunovic, E., Fardanesh, B., Hopkins, L., Shperling, B., Zelingher, S. and Schuff, A. (2001). NYPA convertible static compensator (CSC) application phase I: STATCOM, Vol. 2, IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2001, pp. 1139–1143. DOI: 10.1109/TDC.2001.971418
- Valle, D. B. and Araujo, P. B. (2012). Análise das estruturas de controle do UPFC no amortecimento das oscilações eletromecânicas do sistema elétrico de potência, Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, pp. 1–6.
- Valle, D. B., Kopcak, I. and da Costa, V. F. (2010). Aplicação do controlador IPFC para o amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas de potência, *Congresso Brasileiro de Automática*, Vol. 1, pp. 3383–3390.
- Zhu, L., Zhou, S. and Zhang, Y. (2000). Extended load-flow arithmetic for voltage stability analysis, Power System Technology International Conference.