

다기 전력 시스템 동적 안정도 향상을 위한 UPFC 제어기에 관한 연구

김중현 · 정창호 · 김진오
한양대학교 전기공학과

a study on UPFC Controller for enhancing the Multi-machine Power System Dynamic Stability.

Jong-Hyun Kim · Chang-Ho Jung · Jin-O Kim
Dept. of EE, Hanyang University

Abstract - This paper presents the design of a Unified Power Flow Controller(UPFC) for enhancing the small signal voltage stability in the multi-machine power systems. Recently a lot of attention has been paid to the subject of dynamic stability. The paper deals with analysis of eigenvalue sensitivities with respect to parameters of UPFC Controller. The series branch of the UPFC is designed to damp the power oscillation during transients, while the shunt branch aims at maintaining the bus voltage. Comprehensive time-domain simulation studies using Pss/E show that the proposed robust UPFC controller can enhance the small signal stability efficiently in spite of the variations of power system operating conditions.

1. 서 론

UPFC는 송전선로 임피던스, 위상각 및 무효전력을 제어할 수 있을 뿐만 아니라 STATCOM이나 SSSC같이 독립적으로도 사용이 가능하고 진동에 대한 제동특성이 우수하기 때문에 가장 우수한 FACTS 기기라 불 수 있다. 이러한 UPFC를 계통에 연계하는 경우 계통의 송전용량을 증가시킬 수 있으며 전압제어와 미소 왜란 등으로 인한 계통의 불안정시 제동특성 면에서도 우수하여 계통의 신뢰성이 증대되는 효과를 얻을 수 있다.

향후 지속적인 부하증가로 인해 계통의 임피던스가 증가됨으로 인해 계통의 제동 특성이 나빠지고 지속적인 저주파 진동이 발생하게 될 것이다. 이러한 미소신호 안정도 문제는 전압안정도 문제와 함께 미래의 전력계통의 안전운전에 위협이 되고 송전망의 전송능력을 제한하게 되는 심각한 요인이 될 것이다. 이에 UPFC를 계통에 연계하여 여자가 있는 발전기 모선의 입출력 관계를 모의하여 제동특성의 효과를 살펴 보았다. 또한 본 논문에서는 송전선로에 연계되었을 경우와 연계되지 않았을 경우에 대한 고유치 및 참여계수에 대한 해석과 상정사고시 전압특성의 변화를 고찰함으로써 UPFC기기가 미소신호 안정도 및 전압제어에 어떠한 우수성을 나타내는지 분석하여 동적안정도 개선에 도움을 주는데 목적을 두고 있다.

2. 본 론

2.1. 모드해석(Modal analysis)에 의한 선형해석

관측 다이어그램에 의한 접근방식은 동기기의 미소신호 안정도를 해석하기 위해 사용되어지나 대규모 계통에 대해서는 상세한 연구가 적절치 못하다. 따라서 모의계통의 미소신호 안정도를 선형해석하기 위해 식 (1), (2)와 같은 상태방정식을 이용한다. 여기서 A는 발전기 상태변수에 관한 행렬이고 B는 제어나 입력변수에 관한 행렬, C는 입력에 대한 출력을 나타내는 행렬이고 D는 출력에 나타나는 입력과의 비율을 나타내는 행렬이다.

발전기에 관련된 변수에 관한 특성을 확인하기 위해서는 A행렬에 대한 고유치를 구해야 한다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{1}$$

$$v = Cx + Du \tag{2}$$

여기서,

x, u, v = 상태, 입력, 출력벡터

$$\det(sI - A) = 0 \tag{3}$$

식 (3)에서 s가 A행렬의 고유치를 의미하며 안정한 계통에 대해서 모든 고유치는 실수축 좌반부에 위치한다. 허수부 고유치는 주파수의 진동을 나타내고, 음의 실수부 고유치는 감쇠모드를 의미하므로 크기가 클수록 진동을 더 빠르게 감쇠시킨다.

상태변수와 고유값과의 연관성을 평가할 수 있는 지표를 주는 참여도 지수는 다음과 같이 정의된다.

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} \tag{4}$$

식 (4)는 우측 고유벡터(right eigenvector)와 좌측 고유벡터(left eigenvector)의 곱으로 표현할 수 있다.

$$P_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}} = \frac{w_{ki} v_{ik}}{w_i^T v_i} \tag{5}$$

식 (5)에서 w_i 는 대응되는 고유값의 좌측 고유벡터이고, v_i 는 우측 고유벡터이며, w_{ki}, v_{ik} 는 각각 k번째 원소를 의미한다. 본 논문에서는 UPFC가 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위하여 UPFC를 연계시에 시스템의 고유값에 미치는 영향을 해석했다. 참여계수는 응답하는 모드 내에 각각의 상태변수에 관련된 참여도를 의미하므로 고유치 해석시 중요한 민감도 요소로서 활용한다. 본 논문에서 쓰이는 기기들은 회전자발전기, 돌극형 발전기, 여자기, 조속기/터빈 등등이 적용되며 UPFC 연계시 각각의 상태변수에 대한 모드별 참여도 지수와 고유치를 계산하여 미소신호 안정도에 미치는 영향을 해석하였다.

2.2. UPFC 동적 모델링

단상으로 구성된 그림 1은 직렬측 변압기(BT)와 병렬측 변압기(ET)로 구성되어 있는 UPFC의 구성회로도이다. m은 진폭변조지수이고 δ 는 각 컨버터의 제어신호에 대한 위상각이다. L_E 와 L_B 은 각각 직·병렬 변압기의 인덕턴스이다. 동기 회전자 발전기의 출력전압을 $V_{ED}, V_{EQ}, V_{BD}, V_{BQ}$ 등으로 쓸 수 있으며 식 (6),(7)과 같이 표현된다.

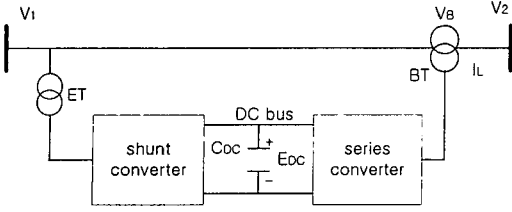


그림 1. UPFC 구성회로도

$$V_{ED} = \frac{m_E V_{dc}}{2} \cos \delta_E \quad V_{EQ} = \frac{m_E V_{dc}}{2} \sin \delta_E \quad (6)$$

$$V_{BD} = \frac{m_B V_{dc}}{2} \cos \delta_B \quad V_{BQ} = \frac{m_B V_{dc}}{2} \sin \delta_B \quad (7)$$

단자간 유효전력의 교환값이 같으므로 아래에 식 (8), (9)을 얻을 수 있다.

$$V_{dc} I_{Edc} = V_{ED} I_{ED} + V_{EQ} I_{EQ} \quad (8)$$

$$V_{dc} I_{Bdc} = V_{BD} I_{BD} + V_{BQ} I_{BQ} \quad (9)$$

$$V_{dc} = \frac{\omega_0}{C_{dc}} I_{dc} - \frac{\omega_0}{C_{dc} R_p} V_{dc} \quad (10)$$

여기서, $\omega_0 = 2\pi f$ (rad/sec).

DC측 회로 방정식은 식 (10)과 같이 표현할 수 있으며, DC전류를 구하기 위해 식 (6), (7), (8), (9)를 조합하여 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$I_{dc} = I_{Edc} - I_{Bdc} = \frac{m_E}{2} (\cos \delta_E I_{ED} + \sin \delta_E I_{EQ}) - \frac{m_B}{2} (\cos \delta_B I_{BD} + \sin \delta_B I_{BQ}) \quad (11)$$

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (12)$$

$$x = [I_{ED} \ I_{EQ} \ I_{BD} \ I_{BQ} \ V_{dc}]^T, \quad u = [V_{1D} \ V_{1Q} \ V_{21D} \ V_{21Q}]^T$$

$$A = \omega_0 \begin{bmatrix} -\frac{R_E}{L_E} & \omega & 0 & 0 & -\frac{m_E}{2L_E} \cos \delta_E \\ -\omega & -\frac{R_E}{L_E} & 0 & 0 & -\frac{m_E}{2L_E} \sin \delta_E \\ 0 & 0 & -\frac{R_B}{L_B} & \omega & \frac{m_B}{2L_B} \cos \delta_B \\ 0 & 0 & -\omega & -\frac{R_B}{L_B} & \frac{m_B}{2L_B} \sin \delta_B \\ \frac{m_E}{2C_{dc}} \cos \delta_E & \frac{m_E}{2C_{dc}} \sin \delta_E & -\frac{m_B}{2C_{dc}} \cos \delta_B & -\frac{m_B}{2C_{dc}} \sin \delta_B & -\frac{1}{C_{dc} R_p} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{\omega_0}{L_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_0}{L_E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\omega_0}{L_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{\omega_0}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

식 (12)는 UPFC의 등가회로에 대한 상태방정식을 나타낸다. A행렬에서 R_p 는 컨버터의 스위칭 손실을 나타내는 캐패시터를 가진 병렬로된 저항을 의미하며,

UPFC 상태변수의 초기조건을 계산하기 쉽게하기 위해서 쓰여졌다. UPFC 변수에 대한 행렬은 A이고, 제어데이터에 대한 변수는 B이다. 상태벡터는 직·병렬측 출력전류를 나타내고 입력벡터 변수는 각각의 d, q축 전압이다. 입력벡터에서 V_{1D} , V_{1Q} 과 V_{21D} , V_{21Q} 는 회전자 발전기에서의 상전압과 상간전압을 나타낸다.

3. 사례연구

사례연구를 위해 6기 20모선 모델을 사용하였으며, 각 발전기 모선의 고유치와 관련된 상태변수의 참여도 계수를 계산하였다. 표 1의 테이블은 UPFC를 연계시키지 않은 정상 계통에서의 각 발전기 모선별 고유치와 고유벡터의 값이고 표 2의 테이블은 UPFC를 연계시의 민감도 값들이다. 이 두 표를 비교해 볼 때 UPFC를 연계시켰을 경우에 고유치의 실수 및 허수부 값이 다른 발전기 모선에서의 값들보다 현저히 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 UPFC의 우수한 제동특성을 나타내 준다.

고유치	관련 기기	관련된 상태변수	참여계수
-1.71 ± j10.39	GEN3008	ω, ψ	1, 0.99
-1.55 ± j10.00	GEN206	ω, ψ	1, 0.99
-1.55 ± j8.91	GEN201	ω, ψ	1, 0.99
-1.45 ± j8.08	GEN102	ω, ψ	1, 0.99
-0.99 ± j7.07	GEN101	ω, ψ	0.99, 0.99
	GEN3001	ω, ψ	1, 0.99
	GEN101	ω	0.19, 0.19
	GEN102	ω	

표 1. 고유치해석 결과

고유치	관련 기기	관련된 상태변수	참여계수
-33.23 ± j37.24	UPFC	Y_q, E_d	1, 0.99
-0.24 ± j18.34	UPFC	ω, ψ	1, 0.99
-1.88 ± j10.73	GEN3008	ω, ψ, Y_q	1, 0.99, 0.19
-1.89 ± j9.99	GEN201	ω, ψ	1, 0.99
	GEN206	ω, ψ	0.84, 0.84
-1.62 ± j8.75	GEN206	ω, ψ	1, 0.99
	GEN201	ω, ψ	0.74, 0.74
	GEN102	ω	1
-1.44 ± j7.95	GEN101	ω	0.99
	GEN102	ψ	0.99
	GEN101	ψ	0.99
-1.17 ± j6.97	GEN3001	ω, ψ	1, 0.99
-8.94 ± j0.52	UPFC	E_q, Y_d	1, 0.47
	GEN201	Y_q	0.64

표 2. UPFC 연계시 고유치해석 결과

제어기 변수에 관한 고유치 민감도는 변수가 변할 때 고유치 이동에 관한 크기와 방향을 가리킨다. 그림 2, 3은 x축을 실수부로 y축을 허수부로 하여 각각의 경우

에 대한 고유치 값들을 표현했다. 그림 3과 같이 고유치 해석에 있어서 upfc 연계시 좌반부에 더 넓게 퍼지고 특히, 허수축 점근선을 따라 생긴 고유치 점은 upfc의 위상보상과 관련하여 상당히 보상되었음을 의미하는 값이다.

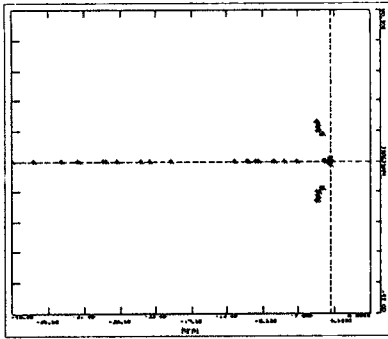


그림 2. 고유치 분포

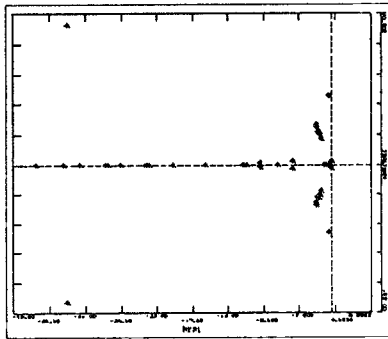


그림 3. UPFC연계시 고유치 분포

여자가 연결된 201모선의 기기에, 기준전압(V_{ref})에 단위 sinusoidal perturbation을 주었을 때 발전기모선의 주계자전압(EFD)에 대한 주파수 응답을 살펴보았다. 입력변수를 기준전압으로 하고 출력변수를 주계자전압으로 하였을 때 주계자전압대 기준전압의 비율이 0.12Hz에서 74.28의 비율값을 가지고 UPFC 연계후에는 0.15Hz에서 71.24의 비율값으로 비율이 줄어 들었다. 이것은 그림 4와 같은 결과를 보이고, UPFC연계시 주계자전압대 기준전압의 비율이 더 낮아진 비율을 보였음은 왜란에 대한 수요가 줄어들어 제동특성이 개선되었음을 의미한다.

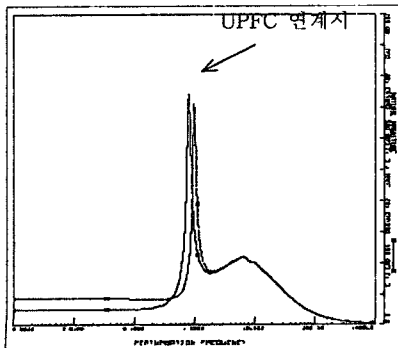


그림 4. 주계자전압/기준전압의 관계

동적 안정도에 대한 효과를 보기 위해 계통의 진동을 유발하기 위한 왜란으로 선택된 모선에 대한 3상 단

락사고시에 대해 모의해 보았다. 그림 5, 6과 같은 결과는 UPFC연계시 전압 및 위상에 대한 보상효과와 제동특성이 우수함을 보여준다. 이와 같은 결과로서 UPFC가 발전기나 부하의 출력, 송전선로 및 전기적, 기계적 변수들의 변화와 같은 계통 운전조건 변화에도 불구하고 미소신호 안정도를 효과적으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있다

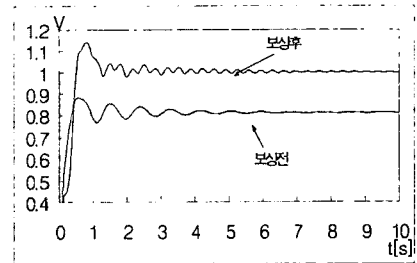


그림 5. 상정사고시 전압

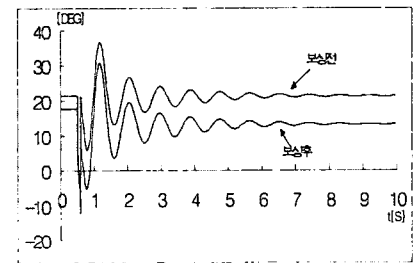


그림 6. 상정사고시 위상각

4. 결 론

점차적으로 급증하고 있는 계통의 부하에 의해 계통리액턴스가 증가되고 기기를 중부하에서 운전하는 추세로 인하여 제동능력이 감소하고 지속적인 저주파 진동이 발생하여 미소신호 안정도 측면에 있어서 효율적인 개선이 요구된다. 이에 UPFC기기의 고유치 개선과 상정사고에 대한 보상효과 등과 같은 강인한 제어능력을 보여줌으로서 동적 전압 안정도 및 미소신호안정도 향상에 우수한 기여를 하고 있음을 모의를 통해 알 수 있다. 부하단에 설치하는 UPFC와 발전기 모선측 간의 최적배치를 고려하여 설치한다면 급증하는 부하에 대비하여 계통의 미소신호안정도 및 동적 전압안정도를 향상시켜 주는데 도움이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Anderspm. "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, Oct. 1997, pp. 1629-1634.
- [2] Jang-Cheol Seo, Seung-II Moon, Jong-Keun Park, Jong-Woong Choe, "Design of a robust UPFC control for enhancing the small signal stability in the multi-machine power systems". Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE, Volume: 3, 2001 Page (s): 1197 -1202 vol.3
- [3] Xiaolu Li, Lixin Bao, Xianzhong Duan, Yangzan He, Mingyan Gao "Effects of FACTS controllers on small-signal voltage stability". Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 2000 Page(s): 2793 -2799 vol.4