

UPFC를 이용한 전력조류 및 모션전압 제어

김경신, 최동수, 이승철
중앙대학교

Power Flow and Bus Voltage Control Using UPFC

Kim Kyoung Shin, Choi Dong Soo, Lee Seung Chul
Chung-Ang University

Abstract - 본 논문에서는 UPFC(Unified Power Flow Controller)의 전력조류해석을 위해 직병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화한 직병렬전압원 모델을 제시한다. 이 모델은 추가된 모선의 전압과 직병렬전압원의 전압을 추가하여 전력조류를 계산하므로, 선로에 흐르는 유무효전력조류를 직접 제어할 수 있다. 전력조류 변화에 따른 직병렬전압원의 전압크기 및 위상각이 변화됨을 확인하였고, UPFC 설치모선의 전압을 제어할 수 있음을 보여 직병렬전압원 모델이 실제계에 적용할 수 있음을 보였다.

1. 서론

유연송전시스템(FACTS : Flexible AC Transmission System) 장비 중 가장 포괄적이며, 효율성이 높은 장비로서 선로로 전송되는 무효전력뿐만 아니라 유효전력도 총체적으로 보상 가능한 일체형조류제어기(UPFC : Unified Power Flow Controller)가 있다.

본 논문에서는 확고한 반복법을 이룰 수 있도록 통합형 조류제어기의 상태변수를 Jacobian과 mismatch 방정식에 포함시켜 Jacobian 행렬을 수정함으로써 기존의 뉴턴-랩슨 전력 조류 계산 알고리즘에 결합하기에 알맞은 통합형 조류제어기 조류계산 모델을 제안하고자 한다.

본 논문에서 제시한 직·병렬 전압원 모델은 직·병렬 전압원의 전압크기와 위상각의 알맞은 초기치를 구하여 수렴 속도를 빠르게 하며, 다른 통합형 조류제어기 해석 모델과는 다르게 병렬컨버터가 전압 제어기로 동작할 수 있어, 전압이 불안정한 모션전압을 조정할 수 있고, 직렬 전압원의 전압크기나 위상각제어를 통하지 않고 선로에 흐르는 전력조류를 직접 제어함으로써 위상각과 전압크기에 의한 제어보다 정확하고 빠르게 전력조류량을 제어할 수 있다.

2. UPFC(Unified Power Flow Controller)

2.1 UPFC의 개요

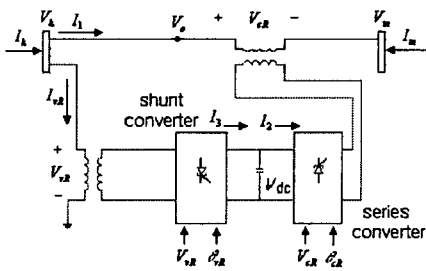


그림 1 UPFC의 개념도

UPFC는 구조적으로 2개의 컨버터가 직류 캐패시터를 통하여 모선에 병렬 연결된 전압원은 해당 모선의 전압을 제어하고 직렬 삽입된 전압원에 의해 소요되는 유효전력을 공급 또는 흡수하는 역할을 한다. 그림.1에 UPFC의 구조도를 나타냈다.

UPFC는 그림 1에 보인 바와 같이 2개의 전압원 컨버터가 하나의 직류 커패시터를 공유해 링크되어 있다. 기능상 컨버터 하나는 송전선로와 병렬로 그리고 다른 하나는 선로와 직렬로 연결되어 있다. 병렬컨버터의 주요 기능은 직렬컨버터에서 필요로 하는 유효전력을 전력계통으로부터 흡수하여 직류링크를 통해 공급하는 것이다. 병렬컨버터는 선로에 유효전력을 공급할 뿐만 아니라 동시에 병렬로 연결된 모선의 무효전력을 조절하는 기능도 한다. 직렬컨버터는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 선로에 직렬로 주입하는 기능을 갖는다. 이때 주입전압의 위상각은 임의로 조정 가능하고, 주입전압 V_{cr} 의 크기는 최대 한계치 내에서 직류 링크전압과 직렬컨버터의 변조율에 의해 결정된다.

2.2 직·병렬전압원 모델의 등가회로

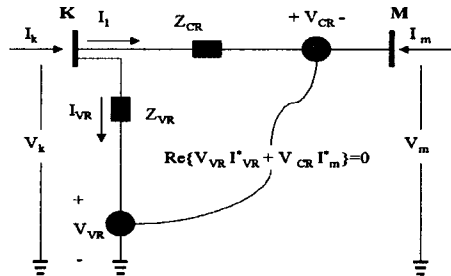


그림 2 UPFC의 등가회로

그림.2에서는 두 개의 이상적인 전압원을 사용하여 등가회로를 나타내고 있다.

$$\overline{V}_{vr} = V_{vr} (\cos \theta_{vr} + j \sin \theta_{vr}) \quad (1)$$

$$\overline{V}_{cr} = V_{cr} (\cos \theta_{cr} + j \sin \theta_{cr}) \quad (2)$$

위 그림처럼 직·병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화하여 추가된 모선M의 모션전압과 직·병렬전압원으로 전력조류를 제어하도록 구성되어 있다.

2.3 직·병렬전압원의 전력방정식

피상전력방정식은 다음과 같이 수식화된다.

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j^* Y_{ij}^* \quad (3)$$

따라서, 그림 2에서의 각 모선의 전력방정식은 모션 K에서,

$$\begin{aligned}
P_k &= V_k^2 Y_{kk} \cos(-\theta_{kk}) + V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_{km} - \theta_{km}) \\
&\quad + V_k V_{cR} Y_{kcR} \cos(\delta_{kcR} - \theta_{km}) + V_k V_{vR} Y_{vR} \cos(\delta_{kvR} - \theta_{vR}) \\
Q_k &= V_k^2 Y_{kk} \sin(-\theta_{kk}) + V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_{km} - \theta_{km}) \\
&\quad + V_k V_{cR} Y_{kcR} \sin(\delta_{kcR} - \theta_{km}) + V_k V_{vR} Y_{vR} \sin(\delta_{kvR} - \theta_{vR}) \quad (4)
\end{aligned}$$

여기서, $\delta_{km} = \delta_k - \delta_m$, $\delta_{kcR} = \delta_k - \delta_{cR}$, $\delta_{kvR} = \delta_k - \delta_{vR}$

$$\begin{aligned}
\text{모선 M에서,} \\
P_m &= V_m^2 Y_{mm} \cos(-\theta_{mm}) + V_m V_k Y_{km} \cos(\delta_{mk} - \theta_{km}) \\
&\quad + V_m V_{cR} Y_{mcR} \cos(\delta_{mcR} - \theta_{mm}) \\
Q_m &= V_m^2 Y_{mm} \sin(-\theta_{mm}) + V_m V_k Y_{km} \sin(\delta_{mk} - \theta_{km}) \quad (5) \\
&\quad + V_m V_{cR} Y_{mcR} \sin(\delta_{mcR} - \theta_{mm})
\end{aligned}$$

여기서, $\delta_{mk} = \delta_m - \delta_k$, $\delta_{kcR} = \delta_k - \delta_{cR}$
다음처럼 보상선로의 전력방정식을 구할 수 있다.
그럼 2에서 나타낸 등가회로에 Kirchhoff 법칙을 적용하
여 각 어드미턴스를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{kk} & Y_{km} & Y_{kcR} & Y_{kvR} \\ Y_{mk} & Y_{mm} & Y_{mcR} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \\ V_{cR} \\ V_{vR} \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서 임피던스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
Y_{kk} &= Y_{kk} (\cos \theta_{kk} + j \sin \theta_{kk}) = Z_{cR}^{-1} + Z_{vR}^{-1} \\
Y_{mm} &= Y_{mm} (\cos \theta_{mm} + j \sin \theta_{mm}) = Z_{cR}^{-1} \quad (7) \\
Y_{km} &= Y_{mk} = Y_{km} (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) = -Z_{cR}^{-1} \\
Y_{vR} &= Y_{vR} (\cos \theta_{vR} + j \sin \theta_{vR}) = -Z_{vR}^{-1}
\end{aligned}$$

보상선로와 직렬컨버터간의 전력수급은 $\overline{V_{cR}} \overline{I_m}^{\circ}$ 으로
구할 수 있고, 병렬컨버터의 전력방정식은 $\overline{V_{vR}} \overline{I_{vR}}^{\circ}$
로 구할 수 있다. P_{mk} 과 Q_{mk} 는 주입전압 V_{cR} 에 보상되
어 선로에 흐르는 유·무효전력조류이므로, 다음식에 의
해서 m과 k 모선사이에 흐르는 전력조류를 구할 수 있
다.

$$P_{mk} + jQ_{mk} = (\overline{V_{cR}} + \overline{V_m}) \overline{I_m}^{\circ} \quad (8)$$

손실을 무시하면 직렬컨버터의 유효전력은 DC link 전
압 V_{dc} 와 I_2 의 곱인 DC전력으로 표시되므로, 병렬컨버
터는 V_{dc} 가 일정하도록 DC전력만큼 직렬컨버터에 공급
하여야 한다. 따라서, 병렬컨버터에서 흡수한 유효전력
 P_{vR} 과 직렬컨버터에서 사용하는 유효전력 P_{cR} 의 합은

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (9)$$

이며, 이 수식이 Power mismatch를 나타내고, 자코비안
행렬에 추가되는 부분이다.

2.4 Jacobian행렬의 수정

Newton-Raphson법을 이용한 전력조류계산식은

$$[f(x)] = [J][\Delta X] \quad \text{이다.}$$

$[f(x)]$ 의 각성분은 다음과 같다.

$$[f(x)] = [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_k \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \quad (10)$$

여기서, power mismatch는 $\Delta P_{bb} = P_{vR} + P_{cR}$ 이다.

$$[\Delta X] = [\Delta \delta_k \Delta \delta_m \Delta V_{vR} \Delta V_m \Delta \delta_{cR} \Delta V_{cR} \Delta \delta_{vR}]^T \quad (11)$$

Jacobian 행렬은 다음과 같다.

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial P_m}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{vR}} \\ \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}} & \frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. 사례연구

본 논문에서는 제시한 조류계산모델을 2기 5모선 계통
인 Hale Network에 적용하여 조류계산을 실행했다.

3.1 UPFC 미설치시 전력조류계산

UPFC를 설치하지 않을 경우 모선 전압크기와 위상각
및 선로의 전력조류계산결과를 나타내면 표.1, 표.2와 같
다.

표.1 정상상태시 모선출력

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(p.u.)	Q(p.u.)
1	1.0600	0.0000	1.3113	0.9081
2	1.0000	-2.0612	0.1999	-0.7159
3	0.9872	-4.6367	-0.4500	-0.1500
4	0.9841	-4.9570	-0.4000	-0.0500
5	0.9717	-5.7649	-0.6000	-0.1000

표.2 정상상태시 전력조류결과

Line		Power at bus & Line flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	89.3362	73.9938
	3	41.7918	16.8208
2	3	24.4724	-2.5176
	4	27.7128	-1.7229
	5	54.6596	5.5599
3	4	19.3816	2.8654
	5	6.5983	0.5185

3.2 UPFC 설치시 전력조류제어

UPFC의 설치구간은 모선3과 모선4사이의 선로에 설치
하였다고 가정하였다. UPFC의 직렬 변압기의 리액턴스
와 병렬 변압기의 리액턴스를 모두 $X_{cR} = X_{vR} = 0.1$ [pu]
로 설정하고, 전력조류의 주제어대상은 모선3과 모선4사

이의 선로의 유·무효전력으로서, 유효전력조류는 30 [MW], 무효전력조류는 2 [MVar]로 가정하였다. 초기치식에 의하여, 병렬전압원의 전압크기 및 위상각은 1[p.u.] , 0°이고, 직렬전압원의 전압크기 및 위상각은 0.03[p.u.] , -86.19°로 취하였다. 병렬컨버터가 Voltage Regulator로 동작하지 않았을 경우(설치 모선의 전압제어를 하지 않았을 경우) 전력조류계산결과는 표.3~표.5와 같다. 모선6은 UPFC 설치시 추가되는 모선이며, 유·무효전력이 모두 0[p.u.]인 부하모선으로 간주한다.

표.3 모선출력

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.0600	0.0000	131.3620	88.9337
2	1.0000	-1.9125	20.0000	-78.4419
3	0.9920	-5.3299	-45.0000	-14.9917
4	0.9887	-4.0616	-40.0000	-5.0000
5	0.9734	-5.3631	-60.0000	-10.0000
6	0.9928	-3.5602	0.0000	0.0000

표.4 전력조류계산결과

Line		Power at bus & Line flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	85.1579	75.2273
	3	46.2041	13.7064
2	3	31.1902	-6.9861
	4	20.5428	-2.1653
	5	51.0345	5.1363
3	6	30.0810	-5.9723
4	5	10.1162	0.5821
	6	-29.8267	-4.5522
6	3	-30.0000	-2.0004
	4	30.0000	2.0004

표.5 직·병렬전압원의 출력

$V_{CR}(p.u.)$	$\delta_{CR}(deg.)$	$V_{VR}(p.u.)$	$\delta_{VR}(deg.)$
0.0610	-98.3900	1.0000	-5.3345

3.3 UPFC 설치시 전력조류제어 및 모선전압제어

4.2와 동일한 조건에서, 병렬컨버터는 Voltage Regulator로 동작하도록 하였다.(설치 모선의 전압제어를 한 경우) 조류제어시 계산결과는 표.6~표.8과 같다.

표.6 UPFC 설치 후 모선출력

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.0600	0.0000	131.8483	85.3727
2	1.0000	-1.9225	20.0000	-82.6858
3	1.0000	-5.4649	-45.0000	-15.0000
4	0.9886	-4.0894	-40.0000	-5.0000
5	0.9734	-5.3791	-60.0000	-10.0000
6	0.9927	-3.5922	0.0000	0.0000

표.7 직·병렬전압원의 출력

$V_{CR}(p.u.)$	$\delta_{CR}(deg.)$	$V_{VR}(p.u.)$	$\delta_{VR}(deg.)$
0.0626	-90.9489	1.0156	-5.4835

여기서,

V_{CR} : 직렬전압원의 전압크기 δ_{CR} : 직렬전압원의 위상각
 V_{VR} : 병렬전압원의 전압크기 δ_{VR} : 병렬전압원의 위상각

표.8 전력조류계산결과

Line		Power at bus & Line flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	85.4395	75.1438
	3	46.4088	10.2289
2	3	31.2122	-11.3428
	4	20.7112	-2.1625
	5	51.1194	5.1424
3	6	30.3295	-13.6791
4	5	10.0334	0.5833
	6	-29.5796	-4.5634
6	3	-30.0000	-1.9998
	4	30.0000	1.9998

모선 전압을 제어한 경우는 UPFC를 설치한 모선의 전압이 1로 고정되고, 병렬전압원의 전압크기도 1.0156으로 계산되지만, 그렇지 않은 경우에는 모선의 전압이 0.9920으로 전압이 고정되지 않은 값으로 나오며, 병렬전압원의 전압크기도 1로 고정된다.

표.8의 결과를 계통도와 함께 나타내면 그림.3과 같다

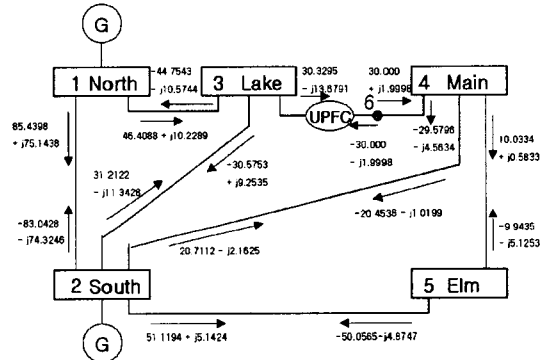


그림 3 시험 계통(Hale Network)과 전력 조류

3. 결론

본 논문에서 제시한 직·병렬전압원 모델을 2기 5모선 계통인 Hale Network에 적용하여 각종 전력조류를 해석하였다. 병렬컨버터의 동작특성에 따른 전력조류해석 및 제어기법을 확인하고, UPFC를 설치하지 않은 계통의 전력조류와 UPFC를 설치한 계통의 전력조류를 비교하여 전력조류변화를 확인함으로써 UPFC의 우수성을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. R. Fuerte-Esquivel, E.Acha, and H.Ambriz-Perez. 'A Comprehensive Newton-Raphson UPFC Model for the Quadratic Power Flow Solution of Practical Power Networks'. IEEE Trans. Power Systems, vol.15, No.1, February 2000.
- [2] L. Gyugui, " Unified Power-Flow Concept for Flexible AC Transmission Systems", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 4, pp. 323-331, July 1992,
- [3] 한국전기연구소, "FACS 엔지니어링 기술분석", 1998년 8월.
- [4] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1998.
- [5] C. R. Fuerte-Esquivel, et al, "UPFC: a Critical Comparison of Newton-Raphson Algorithms in Power Flow Studies", IEE Proc.-Gener. Distrib., Vol. 144, No. 5, pp. 437-444, September 1997.