

UPFC 설치 전력계통의 전력조류해석 및 제어에 관한 연구

김경신 정재길 정인학 나완기 조양행
 중앙대 전자전기공학부, 영동대학

A Study on Power Analysis and Control of Power System With UPFC

Kyoung-Shin Kim, Jai-Kil Chung, In-Hark Chung, Wan-Ki Na, Yang-Haeng Cho
 Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang Univ., Dept. of Electrical Eng. Yeong-Dong College

Abstract - The unified flow controller(UPFC) is one of the most effective devices among the FACTS device family. In principle the UPFC is capable of controlling active and reactive power as well as the voltage magnitude can. Comparisons are made between the proposed and the existing UPFC models, which demonstrate the improvement in both flexibility and efficiency.

1. 서 론

UPFC는 FACTS(Flexible AC Transmission System)기 기 중 가장 효율적이고 포괄적인 기기이며, 유·무효전력을 동시에 제어할 수 있으며, 전압의 크기 또한 제어할 수 있다.

본 논문에서는 뉴턴·랩슨 알고리즘을 이용하여 UPFC 조류제어 및 해석에 용이한 전력조류계산모델을 제시하고자 한다. 제시하고자 하는 직·병렬전압원모델은 직·병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화하고 추가된 모선의 전압과 직렬전압원의 전압으로 전력조류를 계산하여 전력조류에 따른 각 전압원의 전압크기와 위상각의 변화를 확인함으로써 UPFC의 전력조류제어의 효용성을 검토한다. 또 알맞은 초기치를 구하여 수렴속도를 빠르게 하며, 주입모델과는 달리 병렬컨버터도 voltage regulator로 동작할 수 있어, 불안정한 모선전압을 조정할 수 있고, 선로과부하 발생시 선로에 흐르는 전력조류를 직접 제어함으로써 직렬전압원의 전압크기와 위상각을 제어하여 전력조류를 조정하는 것보다 정확하고 빠르게 선로과부하를 해소할 수 있음을 보여 UPFC의 효용성을 확인하고자 한다.

2. UPFC(Unified Power Flow Control)

2.1 UPFC의 구성

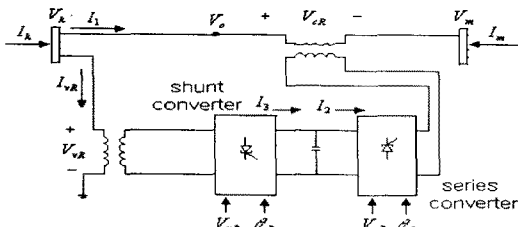


그림.1 UPFC의 개념도

UPFC는 그림.1에 보인 바와 같이 2개의 전압원 컨버터

가 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. 병렬컨버터은 선로에 유효전력을 공급할 뿐만 아니라 동시에 병렬로 연결된 모선의 무효전력을 조절하는 기능도 한다. 직렬컨버터는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 선로에 직렬로 주입하는 기능을 갖는다.

2.2 UPFC의 등가회로

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

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

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

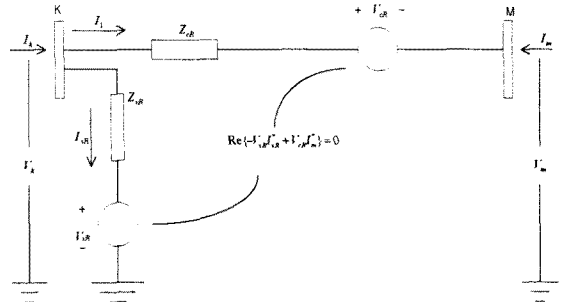


그림.2 UPFC의 등가회로

여기서, 직렬전압원과 병렬전압원의 제어가능한 전압크기와 위상각은

$$V_{vR \min} \leq V_{vR} \leq V_{vR \max} \quad 0 \leq \theta_{vR} \leq 2\pi \quad (2)$$

$$V_{cR \min} \leq V_{cR} \leq V_{cR \max} \quad 0 \leq \theta_{cR} \leq 2\pi$$

3. 직병렬전압원 모델

3.1 직병렬전압원의 전력방정식

피상전력방정식은 다음과 같이 수식화된다.

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

따라서, Fig.2에서의 각모선의 전력방정식은

모선 K에서,

$$P_k = V_k^2 Y_{kk} \cos(-\theta_{kk}) + V_k V_m Y_{km} \cos(\delta_k - \theta_{km}) + V_k V_{cR} Y_{kcR} \cos(\delta_{kcR} - \theta_{km}) + V_k V_{vR} Y_{vR} \cos(\delta_{kvR} - \theta_{vR}) \quad (4)$$

$$Q_k = V_k^2 Y_{kk} \sin(-\theta_{kk}) + V_k V_m Y_{km} \sin(\delta_k - \theta_{km}) + V_k V_{cR} Y_{kcR} \sin(\delta_{kcR} - \theta_{km}) + V_k V_{vR} Y_{vR} \sin(\delta_{kvR} - \theta_{vR}) \quad (5)$$

모선 M에서,

$$P_m = V_m^2 Y_{mm} \cos(-\theta_{mm}) + V_m V_k Y_{km} \cos(\delta_{mk} - \theta_{km}) + V_m V_{cR} Y_{mcR} \cos(\delta_{mcR} - \theta_{mm}) \quad (6)$$

$$Q_m = V_m^2 Y_{mm} \sin(-\theta_{mm}) + V_m V_k Y_{km} \sin(\delta_{mk} - \theta_{km}) + V_m V_{cR} Y_{mcR} \sin(\delta_{mcR} - \theta_{mm}) \quad (7)$$

다음처럼 보상선로의 전력방정식을 구할 수 있다. 여기서, 각 어드미턴스는 다음처럼 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= Y_{kk} (\cos \theta_{kk} + j \sin \theta_{kk}) = Z_{cR}^{-1} + Z_{vR}^{-1} \\ Y_{mm} &= Y_{mm} (\cos \theta_{mm} + j \sin \theta_{mm}) = Z_{cR}^{-1} \\ Y_{km} &= Y_{mk} = Y_{km} (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) = -Z_{cR}^{-1} \\ Y_{vR} &= Y_{vR} (\cos \theta_{vR} + j \sin \theta_{vR}) = -Z_{vR}^{-1} \end{aligned} \quad (9)$$

보상선로와 직렬컨버터간의 전력수급은 $\overline{V_{cR}} \overline{I_m}^*$ 으로 구할 수 있고, 병렬컨버터의 전력방정식은 $\overline{V_{vR}} \overline{I_{vR}}^*$ 로 구할 수 있다.

P_{mk} 과 Q_{mk} 는 주입전압 V_{cR} 에 보상되어 선로에 흐르는 유효·무효전력조류이므로, 다음식에 의해서 m과 k 모선사이에 흐르는 전력조류를 구할 수 있다.

$$P_{mk} + jQ_{mk} = (\overline{V_{cR}} + \overline{V_m}) \overline{I_m}^* \quad (10)$$

손실을 무시하면 직렬컨버터의 유효전력은 DC link 전압 V_{dc} 와 I_2 의 곱인 DC전력으로 표시되므로, 병렬컨버터는 V_{dc} 가 일정하도록 DC전력만큼 직렬컨버터에 공급하여야 한다.

따라서, 병렬컨버터에서 흡수한 유효전력 P_{vR} 과 직렬컨버터에서 사용하는 유효전력 P_{cR} 의 합은

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (11)$$

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

3.2 Jacobian행렬의 수정

Newton-Raphson법을 이용한 전력조류계산식은

$$[f(x)] = [J][\Delta X] \quad (12)$$

$[f(x)]$ 의 각성분은 다음과 같다.

$$[f(x)] = [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_k \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \quad (13)$$

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

$$X = [\Delta \delta_k \Delta \delta_m \Delta V_{vR} \Delta V_m \Delta \delta_{cR} \Delta V_{cR} \Delta \delta_{vR}]^T \quad (14)$$

Jacobian 행렬은 다음과 같다.

$[J] =$

$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial P_k}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial P_k}{\partial V_m}$	$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial P_k}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial P_m}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial P_m}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial P_m}{\partial V_m}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial P_m}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial P_m}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial Q_m}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial V_m}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial Q_m}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial V_m}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial P_{mk}}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_m}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial Q_{mk}}{\partial \delta_{vR}}$
$\frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_k}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_m}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{vR}}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial V_m}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{cR}}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial V_{cR}}$	$\frac{\partial P_{bb}}{\partial \delta_{vR}}$

3.3 직·병렬전압원 모델의 초기조건

직렬전압원의 초기조건은 다음과 같다.

$$\delta_{cR} = \arctan \left(\frac{P_{mref}}{|C_1|} \right) \quad (15)$$

$$V_{cR}^0 = \left(\frac{X_{cR}}{V_m^0} \right) \sqrt{P_{mref}^2 + C_1^2} \quad (16)$$

$$\text{여기서, } C_1 = Q_{mref} - \frac{V_m^0}{X_{cR}} (V_m^0 - V_k^0) \quad (17)$$

X_{cR} 은 직렬전압원의 inductive reactance이고, 첨자 0은 initial value를 나타낸다.

병렬전압원의 전압크기의 초기조건은 병렬컨버터의 동작 특성에 따라 다르다. 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작하면, 병렬전압원의 전압크기는 매회 반복 시 그 값이 변하며, 만약 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작하지 않는다면, $V_{vRmin} \leq V_{vR} \leq V_{vRmax}$ 범위 안에서 매회 반복 시 고정된 값으로 유지된다.

병렬전압원의 위상각 초기조건은 다음과 같다

$$\delta_{vR} = -\arcsin \left(\frac{(V_k^0 - V_m^0) V_{cR}^0 X_{vR} \sin(\delta_{cR}^0)}{V_{cR}^0 V_k^0 X_{cR}} \right) \quad (18)$$

X_{vR} 은 병렬전압원의 inductive reactive이다.

4. 사례연구

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

4.1 UPFC 설치시 전력조류제어

병렬컨버터는 Voltage Regulator로 동작하며, UPFC설치 선로의 유효전력조류를 30MW, 무효전력조류를 2 MVar로 제어(제한)하고, 초기치에 따른 수렴속도가 차이가 많으므로, 각 초기치는 초기조건방정식(식15~18)에 각각 구할 수 있으며, 단 병렬전압원의 전압크기는 모선전압의 초기치와 같은 1[p.u.]이다.

각 모션출력의 결과치는 표.1과 같으며, 전압원 및 전력 조류는 표.2와 표.3에 나타나 있다.

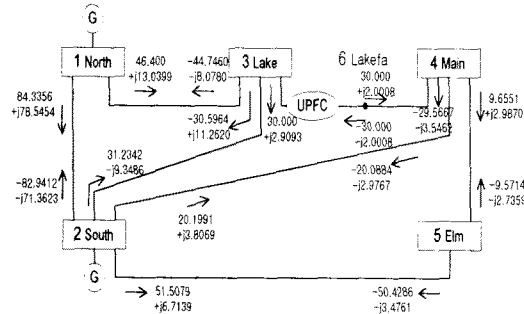
표.1 모션출력

Bus	V	Angle	P	Q
1	1.0600	0.0000	131.735	85.405
2	1.0000	-1.9188	20.000	-78.690
3	1.0000	-5.4637	-45.000	-15.000
4	0.9880	-4.1634	-40.000	-5.000
5	0.9731	-5.4020	-60.000	-10.000
6	0.9921	-3.6656	0.000	0.000

표.2 직·병렬전압원의 출력

V_{CR}	Angle	V_{LR}	Angle
0.0614	-90.3338	1.0156	-5.4830

그림.3 전력조류 흐름도



4.2 과부하해소 효과

모든선로는 2회선선로이고, 최대정격용량은 정상운전시의 150%이라는 가정하에서 모션 3과 4사이의 선로의 개방 고장시 모션 3과 4사이 선로의 과부하율이 120%로써 가장 컸다. 따라서 유효전력조류를 최대선로용량인 14.539 MW로, 무효전력조류는 정상운전시와 같은 전력조류인 1.4327 MVar로 제한하여 선로의 과부하를 해소하였으며, 결과는 표.3과 같다.

표.3 3-4 모션간에 UPFC설치시 전력조류결과

From	To	유효전력	선로용량	과부하율(%)
1	2	40.076	67.002	67.275
	3	20.504	31.344	65.416
2	3	11.614	18.354	63.277
	4	14.529	20.784	69.904
3	5	27.678	40.995	67.515
	6	14.538		
4	5	2.964	4.949	59.890
	6	-14.308		
6	3	-14.538		
	4	14.538	14.538	100
Loss		5.941		단위 : MW

4.3 전력조류제어에 따른 UPFC전압원의 변화

UPFC설치선로의 무효전력은 2Mvar로 고정하고 유효전력을 변화함에 따른 전압원의 변화를 표시하면 그림.4와 같으며, 또 유효전력을 30MW로 고정하고 무효전력을 변화함에 따른 전압원의 변화를 표시하면 그림.5와 같다.

그림.4 유효전력제어에 따른 전압원의 변화

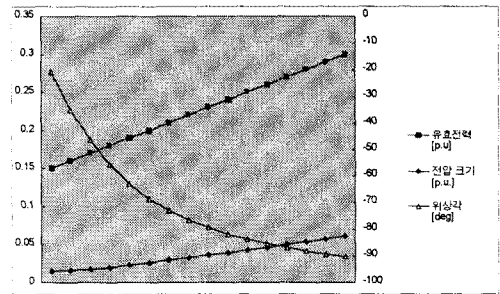
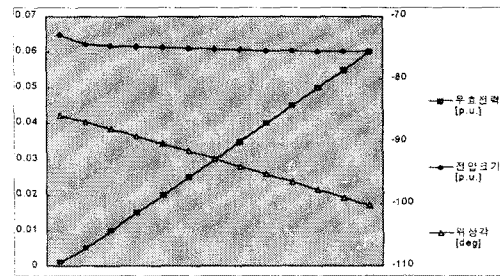


그림.5 무효전력제어에 따른 전압원의 변화



4.4 초기치에 따른 수렴속도 비교

초기치에 따라 수렴속도의 차이를 비교하여 초기치가 조류계산프로그램에 미치는 영향을 확인한 결과는 표.4와 같으나, 병렬전압원의 초기치는 계산프로그램에 거의 영향을 미치지 않는다.

표.4 초기치에 따른 영향

V_{CR} [p.u]	δ_{CR} (deg)	iteration
0.03	-86.19	5
0.01	180.0	12
0.02	180.0	14
0.02	0.0	9

5. 결 론

본 논문은 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기 중 가장 포괄적이며, 효과적인 UPFC를 송전선로에 설치 후 선로의 전력조류를 해석하고, 제어하는 기법을 제시하였으며, 선로과부하 발생 시 UPFC의 선로과부하 해소효과를 보였고, 병렬컨버터의 동작특성에 따른 전력 조류해석 및 제어기법을 제시함으로써 UPFC의 효율성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- (1) N.Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Sp Vol.30, No. 4, pp. 40-45, April 1993.
- (2) C.R Fuerte-Esquivel, et al "UPFC : A Critical Con of Newton-Raphson Algorithms in Power Flow St IE E Proc. Vol 144, No. 5 pp. 437-444 September
- (3) Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-h
- (4) G.W. Stagg "Computer Method in Power System A s", McGraw-Hill, 1998