

UPFC를 이용한 선로 과부하 해소에 관한 연구

강인수* 이인용* 박규홍** 정재길*
*중앙대학교 전기공학과 **대림대학 전기과.

A Study on the Line Overload Alleviation Using Unified Power Flow Controller

In-Su Kang, In-Yong Lee, Kyu-Hong Park, Jae-Kil Chung

*Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang Univ. **Dept. of Electrical Eng. Dae-Lim College

Abstract - This paper provides the steady-state UPFC model referred as *UPFC injection model* for power flow control. The application of UPFC for the line overload alleviation is demonstrated through a numerical example. It is shown that UPFC has the capability of regulating the power flow, therefore alleviating the line overload.

1. 서 론

송전선로를 흐르는 전력에 대한 연구에서 송전선로의 리액턴스와 위상각의 제어는 교류 송전 계통에서 전력 조류의 제어를 위한 효과적인 방법임을 알 수 있다. 최근 반도체 소자 기술의 발달로 선로 임피던스, 송수전단 전압의 크기와 위상을 동시에 제어할 수 있게 되었다. 이를 이용하여 교류 송전 선로에 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 제어 기술을 도입하여 교류 계통의 한계 점을 보완하고 보다 효율적이고 유연하게 운용하도록 개선시키는 유연송전시스템(FACTS) 기술이 1980년대 말에 EPRI에 의해서 제안되었다[1].

FACTS 기기로는 선로와 병렬로 연결되어 모선의 전압 안정도를 유지하고 선로의 전송 용량을 증대시키는 정지형 동기 조상기(STATCOM), 이와 동일한 구조를 가지며 선로와 직렬로 동작하는 정지형 동기 직렬 보상기(SSSC) 등이 있다. STATCOM과 SSSC의 직류 링크단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력 뿐만 아니라 유효전력도 보상 가능한 통합조류제어기(UPFC)의 개념이 L. Gyugyi에 의해 정립되었다[2].

본 논문은 조류 계산을 이용하여 정상상태에서의 UPFC를 해석하고 선로 과부하 해소를 위한 UPFC의 성능을 연구한 것이다. 조류 계산을 위한 UPFC의 수학적 모형을 소개하였고, 전력계통에 미치는 UPFC의 영향을 고려하기 위하여 "UPFC 주입모형"을 도입하여 Newton-Raphson 법을 이용하여 조류 계산을 수행하였다[3]. 사례연구로서 UPFC가 1개 설치된 5 모선의 전 계통에 대한 모의실험으로서 과부하 해소를 위한 UPFC의 효용성을 입증하였다.

2. UPFC의 동작 원리

UPFC는 그림1과 같이 두 개의 컨버터로 구성되며 직류 커패시터를 공유하여 링크되어 있다.

컨버터1은 컨버터2가 필요로 하는 유효전력을 공급 또는 흡수한다. 그리고 선로에 대하여 독립적으로 무효전력을 공급 또는 흡수하여 병렬 무효보상을 한다.

컨버터2는 UPFC의 주기능을 담당하는데, 크기와 위상을 제어할 수 있는 전압 벡터를 직렬 변압기를 통하여 선로에 주입하여 유효전력을 교환하며 무효전력을 자체적으로 공급 또는 흡수한다.

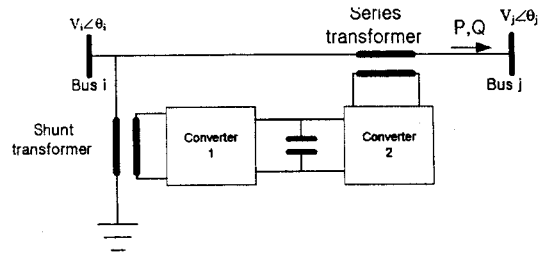


그림 1: UPFC의 기본 구성도

3. 조류계산을 위한 UPFC의 모형

UPFC의 정상상태 모형은 컨버터1은 병렬 전류원으로 컨버터2는 직렬 전압원으로 나타낼 수 있다[2]

정상상태에서 UPFC를 포함하여 조류계산을 할 때, 병렬 전류원은 그 주입전류에 모선 전압을 곱하여 유효, 무효 전력이 계산되지만 직렬 전압원은 조류계산에 그대로 이용할 수 없으므로 조류계산을 위한 모형이 필요하다.

3.1 직렬 전압원의 모형

계통에서 모선 i 와 j 사이에 직렬 전압원이 있다고 하면, 직렬 전압원 컨버터는 리액턴스 X_s 와 직렬로 연결된 **이상 직렬 전압원** \bar{V}_s 로 모형화 할 수 있다. 그림2에서 \bar{V}_s 는 **이상 전압원**이고 \bar{V}_i 는 직렬 리액턴스 배후 가상 전압이다.

$$\bar{V}_i = \bar{V}_s + \bar{V}_i \tag{1}$$

직렬 전압원 \bar{V}_s 의 크기와 위상은 제어 가능하다. 즉;

$$\bar{V}_s = r \bar{V}_i e^{j\theta} \tag{2}$$

그림3은 등가회로의 벡터도이다.

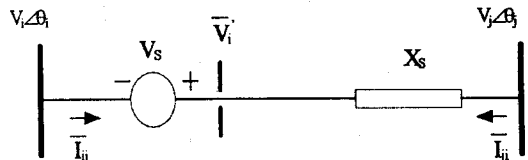


그림 2: 직렬 전압원의 등가회로

전압원 \bar{V}_s 를 선로와 병렬인 전류원 $\bar{I}_s = -jb_s \bar{V}_s$ 로 바꾸면 주입 모형이 된다. 여기서

$$b_s = \frac{1}{X_s} \text{이다}[4].$$

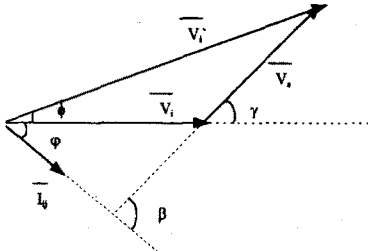


그림 3: 직렬 전압원 등가회로의 벡터도

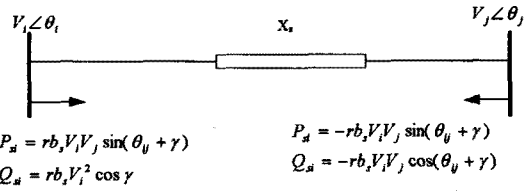


그림 6: UPFC 등가 모형

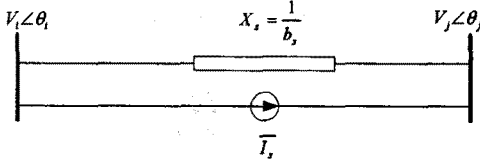


그림 4: 직렬 전압원의 등가 전류원

전류원 \bar{I}_s 는 주입전력 \bar{S}_{is} 과 \bar{S}_{js} 에 상응하므로,

$$\bar{S}_{is} = \bar{V}_i(-\bar{I}_s)^* \quad (3)$$

$$\bar{S}_{js} = \bar{V}_j(\bar{I}_s)^* \quad (4)$$

주입전력 \bar{S}_{is} 와 \bar{S}_{js} 를 간략화 하면:

$$\bar{S}_{is} = \bar{V}_i[-jb_s r \bar{V}_i e^{j\gamma}]^* = -b_s r V_i^2 \sin \gamma - jrb_s V_i^2 \cos \gamma \quad (5)$$

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 로 정의하면,

$$\begin{aligned} \bar{S}_{js} &= \bar{V}_j[-jb_s \bar{V}_i e^{j\gamma}]^* \\ &= rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) + jrb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \end{aligned} \quad (6)$$

로 표현된다.

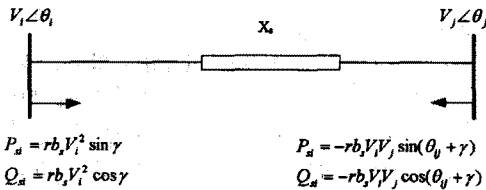


그림 5: 직렬 전압원의 주입 모형

3.2 UPFC 모형

UPFC에서 컨버터1은 주로 직렬 전압원이 계통에 주입하는 유효전력을 제공하는데 사용되며 손실을 무시하면:

$$P_{conv1} = P_{conv2} \quad (7)$$

컨버터2가 송전선로에 주입하는 피상전력, 유효전력, 무효전력은 다음과 같다.

$$S_{conv2} = \bar{V}_s \bar{I}_s^* = re^{j\gamma} \bar{V}_i \left(\frac{\bar{V}_i - \bar{V}_j}{jX_s} \right) \quad (8)$$

$$P_{conv2} = rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) - rb_s V_i^2 \sin \gamma \quad (9)$$

$$Q_{conv2} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) + rb_s V_i^2 \cos \gamma + r^2 b_s V_i^2 \quad (10)$$

$Q_{conv1} = 0$ 이라 가정하면, 직렬 전압원 모형에 유효전력 부분을 더해주면 그림6과 같이 등가 모형이 구해진다.

3.3 조류계산을 위한 UPFC 주입 모형

UPFC 주입 모형은 조류계산에 쉽게 결합된다. UPFC 모선 i 와 j 사이에 있다면, 어드미턴스 행렬은 모선 i 와 j 사이에 X_s 를 추가하여 수정하고 Jacobian 행렬은 주전력을 추가하여 수정한다. 수정 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (11)$$

표1은 Jacobian 행렬을 수정한 것이다.(첨자 o는 UPF 없을 때의 Jacobian 요소를 나타낸다)

표1: Jacobian 행렬의 수정

$H_{(i,i)} = H_{(i,i)}^0 - Q_{si}$	$N_{(i,i)} = N_{(i,i)}^0 - P_{sj}$
$H_{(i,j)} = H_{(i,j)}^0 + Q_{sj}$	$N_{(i,j)} = N_{(i,j)}^0 - P_{si}$
$H_{(j,i)} = H_{(j,i)}^0 + Q_{si}$	$N_{(j,i)} = N_{(j,i)}^0 + P_{sj}$
$H_{(j,j)} = H_{(j,j)}^0 - Q_{sj}$	$N_{(j,j)} = N_{(j,j)}^0 + P_{si}$
$M_{(i,i)} = M_{(i,i)}^0$	$L_{(i,i)} = L_{(i,i)}^0 + 2Q_{si}$
$M_{(i,j)} = M_{(i,j)}^0$	$L_{(i,j)} = L_{(i,j)}^0$
$M_{(j,i)} = M_{(j,i)}^0 - P_{sj}$	$L_{(j,i)} = L_{(j,i)}^0 + Q_{sj}$
$M_{(j,j)} = M_{(j,j)}^0 + P_{si}$	$L_{(j,j)} = L_{(j,j)}^0 + Q_{si}$

4 사례연구

Hale Network[5]에서 UPFC가 Main 모선과 Elm 사이의 선로7에 설치되었다고 가정한다. 정상상태에서 선로7에 흐르는 유효전력은 6.60MW이고 선로용량은 50MVA라고 가정한다. South 모선과 Elm 모선 사이 선로5가 단선되는 상정사고에 대해서 고려해 보자.

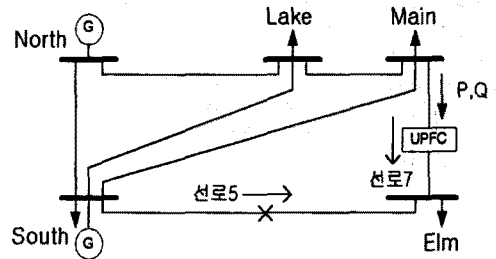


그림 7: Hale Network

표 2: 정상상태 Hale Network 선로 조류

선로 번호	모선	유효전력 (MW)	무효전력 (Mvar)
1	North - South	89.33	74.00
2	North - Lake	41.79	16.82
3	South - Lake	24.47	-2.52
4	South - Main	27.71	-1.72
5	South - Elm	54.66	5.56
6	Lake - Main	19.39	2.86
7	Main - Elm	6.60	0.52

표 3: 상정사고시 Hale Network 선로 조류

선로 번호	모선	유효전력 (MW)	무효전력 (Mvar)
1	North - South	81.47	76.33
2	North - Lake	56.04	25.18
3	South - Lake	45.17	6.75
4	South - Main	53.99	9.99
5	South - Elm	0	0
6	Lake - Main	52.15	13.69
7	Main - Elm	63.99	17.85

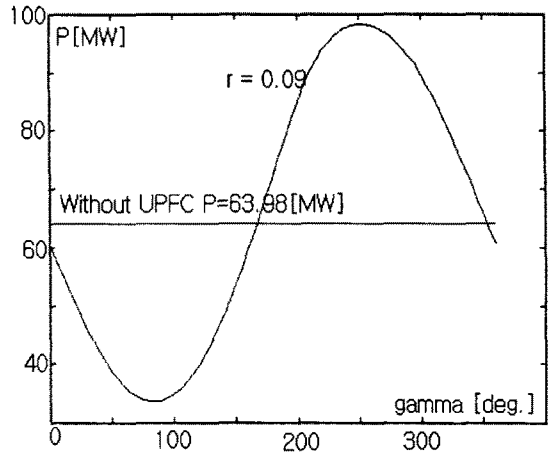


그림 9: gamma(γ)에 따른 유효전력의 변화

위 표에서 알 수 있듯이 선로5가 단선 되는 경우에 가장 큰 전송전력의 변화를 보이는 선로가 선로7이다. 상정사고에서 선로7은 10배에 이르는 조류의 증가를 보인다. UPFC가 주입하는 주입 전압에 의한 선로7의 조류 변화를 그림8,9에 나타내었다.

UPFC의 주입전압에 따라 선로 조류를 34-116MVA, 33~98MW까지 제어할 수 있다. UPFC의 주입 전압의 γ 가 25~120°의 값에서 선로7의 과부하는 해소된다.

5. 결 론

상정사고에 기인하는 선로 과부하 해소대책에서 UPFC에 의해 송전선로에 주입되는 전압을 적절히 제어함으로써 과부하 해소를 입증하였다. 선로 탈선의 상정사고에 대한 사례연구로서 모선 전압의 0.09p.u의 전압을 주입함으로써 UPFC가 설치된 선로의 피상전력 및 유효전력 조류의 변화를 확인 함으로써 UPFC의 조류제어 효용성을 입증하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] N. Hingorani, "FACTS, Flexible Transmission Sys In Proceedings of 5th International Conference on A DC Power Transmission, London, pp.1-7, Sep. 1991.
- [2] L. Gyugyi, et al, "The Unified Power Flow Control New Approach To Power Transmission Control", IEEE W Meeting, Paper No. 94-SM 474-7 PWRD, 1994.
- [3] M. Noroozian, et al, "Use of UPFC for Optimal Flow Control", IEEE Transmission on Power Del Vol.12, No.4, pp.1629-1634, 1997
- [4] M. Noroozian, G. Anderson, "Power Flow Cont Use of Controllable Series Components", IEEE Trans on Power Delivery, vol. 8, No. 3, pp. 1420-1429, July
- [5] G.W.Stagg and A.Abiad, "Computer Methods in System Analysis", McGraw-Hill, New York, 1st ed.

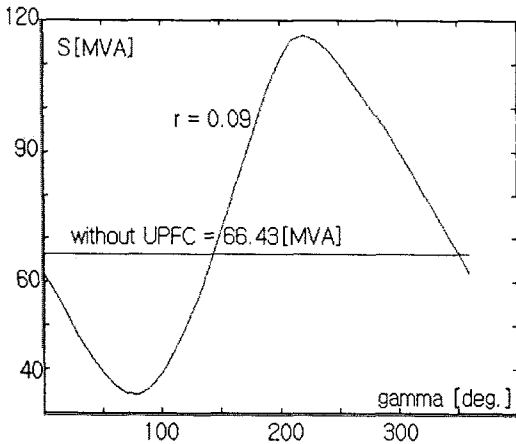


그림 8: gamma(γ)에 따른 피상전력의 변화