

IPLAN을 이용한 UPFC 조류계산 모형

국경수*, 김학만*, 진진홍*, 오태규*, 장병훈**, 추진부**
한국전기연구소*, 전력연구원**

UPFC model for power flow using IPLAN

Kyung-Soo Kook*, Hak-Man Kim*, Jin-Hong Jeon*, Taekyoo. Oh*, Byung-Hoon Jang**, Jin-Bu Chu**
KERI*, KEPRI**

Abstract - This paper presents an approach that provides an equivalent initial operating condition of UPFC in load-flow study for stability analysis. The UPFC model for load-flow implemented by IPLAN in PSS/E is represented by an equivalent load injection. In doing so, the transmission line to which UPFC is connected is disconnected and the function of UPFC is represented by the equivalent load variation. This operating condition may not be adequate as an initial condition for subsequent dynamic simulation. The proposed approach provides a way of equivalencing UPFC load injection without line disconnection. The method was applied to a realistic power system for validity test.

조류와 모선의 전압을 제어하게 되는데 이러한 UPFC의 동작은 그 제어효과를 동기조상기와 부하로 등가화하여 조류계산의 해를 구함으로써 조류계산에 반영된다. 즉, UPFC의 병렬 부분은 그림 1(a)의 병렬단 모선에 승압변압기를 이용하여 연결된 동기조상기와 부하로 모의하는데, 이 때 UPFC의 병렬부분이 연결되는 모선은 발전기 모선으로 취급한다. UPFC의 직렬 부분은 동기 직렬 전압원으로 처리하는 것이 요구되나, 편이상 조류계산에서는 UPFC의 직렬부분을 처리하기 위해서 그림 1(b)와 같이 UPFC의 직렬부분이 삽입되어 있는 선로를 절단하고, 새로운 가상모선(dummy bus)을 통해 선로에 원하는 유효전력과 무효전력을 주입하는 방법을 이용한다. 유효전력의 흐름은 병렬단의 모선과 직렬단의 가상모선에서의 양의 부하와 음의 부하의 주입으로 처리한다. [2,3]

1. 서 론

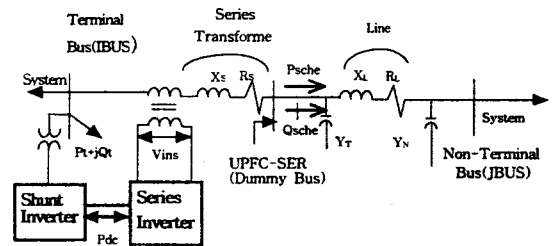
현재 널리 사용되고 있는 계통해석 프로그램 패키지들에서 FACTS 모델은 아직 표준모델이 제공되지 못하고 있으며 대신 각 프로그램의 개발자들은 기존의 프로그램 패키지에 적용될 수 있는 External macro programming을 사용하여 FACTS 설비들을 모델링 하여 계통해석에 적용하고 있다. 특히 PSS/E 프로그램의 경우에는 External macro programming으로서 IPLAN을 이용하여 FACTS 설비를 모델링하고 있는데 UPFC의 경우를 살펴보면 조류계산에서는 UPFC의 제어효과를 동기조상기와 부하로 등가화 하여 정상상태에서의 모선 전압과 선로조류제어의 효과가 반영된 조류계산 해를 구하는 기법이 사용되고 있으며 [1,2] 안정도 해석에서는 UPFC를 직렬인버터에 대응하는 1개의 전압원과 병렬인버터에 대응하는 다른 1개의 전압원으로 등가 한 후 직렬 전압원을 Norton 등가회로로 변환하고 이때의 직렬 전류원을 다시 한 쌍의 병렬 전류원으로 나누어 안정도해석에 이용하는 방법이 사용되고 있다 [2]. 이러한 모델은 External macro programming을 사용하여 base case에 대한 조류계산, 선로 구성 변경, 발전기나 부하의 삽입, 반복조류계산 등의 절차가 필요하고 특히 조류계산에서의 선로 구성 변경은 조류계산의 수렴성 문제 뿐만 아니라, 안정도 해석시의 초기조건으로 적용할 경우 조류계산시와 계통 구성이 다르게 되는 문제가 있다.

본 논문에서는 조류계산시에 적용되는 등가부하 주입 모델을 안정도 해석에 적용하는 방법을 제안하고 이를 실제 계통 해석에 적용하여 해석 결과를 비교 분석하였다.

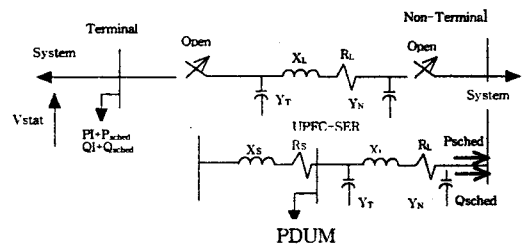
2. IPLAN을 이용한 UPFC 계통해석

2.1 UPFC 조류계산을 위한 계통구성

UPFC는 정상상태에서 UPFC가 연결된 선로의 선로



(a) UPFC 실제 구성



(b) UPFC 등가 모형

그림 1. UPFC 조류계산의 계통구성

이와 같은 UPFC의 조류계산을 위한 등가회로는 External macro programming을 사용하기 때문에 base case에 대한 조류계산, 선로의 절단, 발전기나 부하의 삽입, 반복조류계산 등의 절차가 필요하고 특히 이러한 선로구성의 변경은 안정도 해석시의 초기조건으로 적용할 경우 조류계산시와 계통 구성이 다르게 되는 문제가 있다.

2.2 UPFC 안정도해석을 위한 계통구성

안정도해석을 위한 UPFC의 직접적인 모델은 다음

그림 2와 같이 직렬인버터에 대응하는 1개와 병렬인버터에 대응하는 1개의 두 전압원으로 구성된다. 이때 직렬 전압원은 Norton 등가회로로 그림 3과 같이 전류원으로 변환되고 이 직렬 전류원은 다시 그림 4와 같이 한 쌍의 병렬 전류원으로 나누어지는데 이러한 병렬 전류원은 안정도 해석 프로그램에서 쉽게 적용될 수 있다.

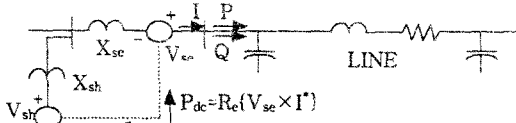


그림 2. 2개의 전압원에 의한 UPFC 등가계통

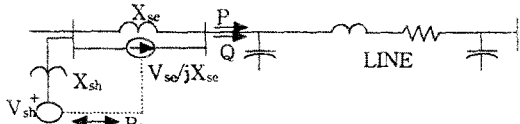


그림 3. 전류원으로 등가된 직렬 전압원

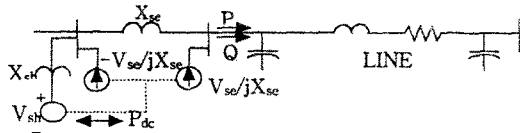
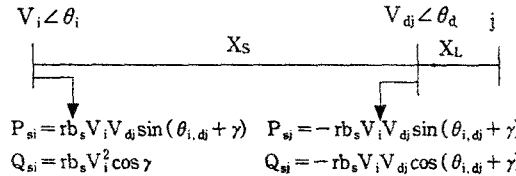


그림 4. UPFC 모선에 전류를 주입하는 2개의 전류원

이와 같은 UPFC의 주입모델을 IPLAN을 이용하여 다음과 같이 구성할 수 있다. [4]



단, $\bar{V}_s = r\bar{V}_i e^{j\gamma}$

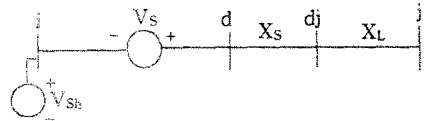
그림 5. UPFC 안정도해석 주입모델

이와 같은 계통구성은 그림에서 알 수 있듯이 UPFC의 제어변수인 r 과 γ 가 등가회로에 직접 반영되므로 UPFC의 제어효과가 포함된 계통의 안정도해석이 가능하게 된다.

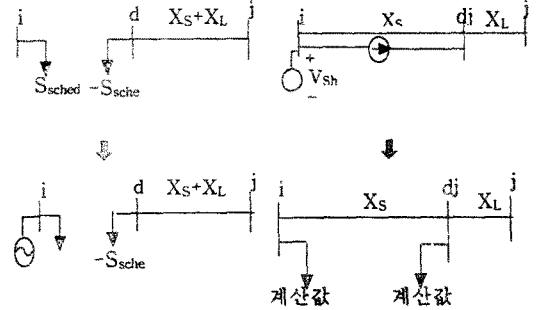
3. UPFC 조류계산 결과를 이용한 UPFC의 안정도해석을 위한 계통의 구성

UPFC는 정상상태에서 지정모선의 전압과 설치선로의 선로조류를 제어하는 반면 과도상태가 발생하는 경우, 전압 및 조류제어를 통하여 계통안정화 작용을 하게 된다. 따라서 UPFC의 안정도 해석을 위해서는 정상상태에서의 UPFC 제어효과가 반영된 조류계산 결과를 안정도 해석의 초기 값으로 이용해야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 UPFC의 조류계산결과를 안정도해석을 위한 계통구성으로 변환하는 방법을 제안한다. 이를 위해 IPLAN(PSS/E)을 사용한 조류계산에서의 계통구성과

안정도 해석에서의 계통구성을 비교하여 나타내면 다음과 같다.



<조류계산을 위한 계통구성> <안정도해석을 위한 계통구성>



단, 계산값에서

$$\bar{V}_s = r\bar{V}_i e^{j\gamma} \quad (1)$$

$$P_{si} = rb_s V_i V_{dj} \sin(\theta_{i,dj} + \gamma) \quad (2)$$

$$P_{sj} = -rb_s V_i V_{dj} \sin(\theta_{i,dj} + \gamma) \quad (3)$$

$$Q_{si} = rb_s V_i^2 \cos \gamma \quad (4)$$

$$Q_{sj} = -rb_s V_i V_{dj} \cos(\theta_{i,dj} + \gamma) \quad (5)$$

그림 6. 조류계산에서의 계통구성과 안정도 해석에서의 계통구성의 비교

그림에서 알 수 있듯이 조류계산의 계통구성에서는 기존 선로가 절단되고 가상모선인 d모선에 부하가 주입되어 $X_s + X_L$ 로 등가된 선로에 선로조류 지정치가 흐르는 반면 안정도 해석의 계통구성에서는 가상 모선인 dj모선에 부하가 주입되고 선로의 절단 없이 X_L 로 등가된 선로에 선로조류 지정치가 흐른다. 또한, 부하 주입시 조류계산의 계통구성에서는 선로조류의 지정치가 곧바로 부하 주입량이 되지만 안정도 해석의 계통구성에서는 base case의 해석 결과에 의한 계산 값이 부하 주입량으로 사용된다. 그러므로 조류계산의 계통구성에 의한 해석 결과를 안정도 해석의 계통구성으로 변환하기 위해서는 우선 안정도 해석모델의 부하 주입량을 계산해야 한다. 그러나 이 주입량의 계산에는 계산식에서 알 수 있듯이 dj모선의 전압과 위상각 값이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 조류계산의 계통구성을 사용한 해석 결과로부터 안정도 해석의 계통을 구성하는 첫 단계로 조류계산 계통구성의 해석결과에 dj모선을 추가하여 다시 조류계산을 수행한다. 또한, 이때 안정도해석의 계통구성에서는 제어 선로가 X_L 선로로 등가 되기 때문에 조류계산 계통구성에서의 선로조류 제어효과는 이 X_L 선로에 적용된다. 따라서 조류계산의 계통구성에서도 X_L 선로에 선로조류 지정치가 흐르도록 조류계산 해가 재조정된다. 그리고 이 결과로부터 식 (1)-(5)를 사용하여 안정도 해석 계통구성에서의 부하주입량을 계산한 후 안정도 해석을 위한 등가회로를 구성한다. 이러한 과정을 정리하면 다음과 그림 7과 같다.

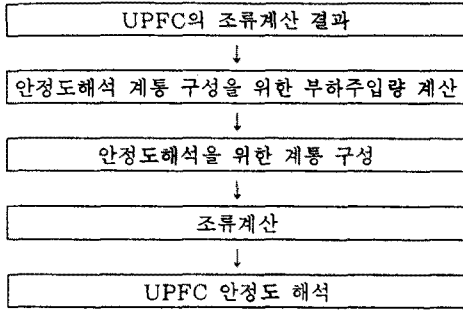


그림 7. UPFC의 조류계산 계통구성의 안정도해석 계통구성으로의 변환

4. 사례 연구

제안된 모델변환 방법을 실계통 해석에 다음과 같이 적용하여 결과를 검증하였다.

- 대상계통 : 2006년 한전계통
- 모의선로 : 신영주(5500)-신제천(5700)간 345kV 선로
- 적용목적 : 신영주 모선의 전압 유지와 신영주(5500)-신제천(5700)간 선로의 선로 조류 제어

선로조류를 $700 + j16.8$ [MVA]로 지정한 경우에 대한 모델변환 절차를 다음 그림 8. 에 보인다.

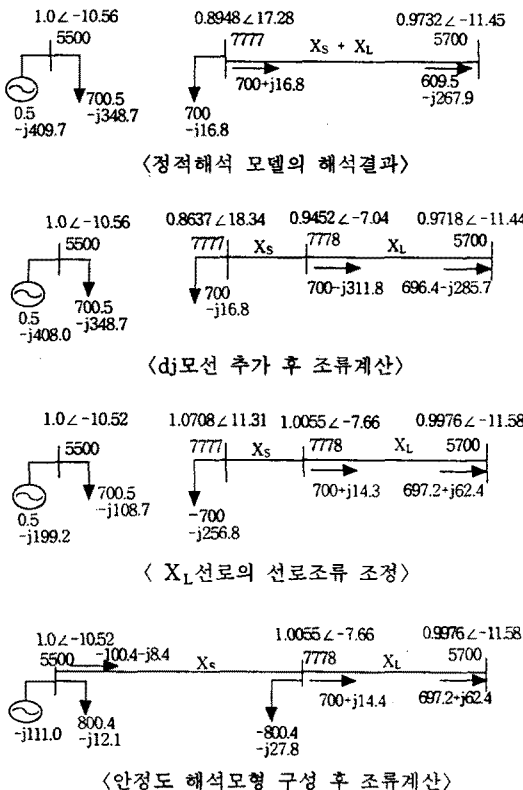


그림 8. UPFC 해석의 모델변환 과정

이와 같은 방법을 여러 가지 제어입력에 대해 적용하여 정적 해석모델 결과를 안정도 해석모델로 변환하여 보고 그 결과를 제어선로의 조류량을 기준으로 다음과 같이 정리하였다.

표 1. UPFC 모델변환의 적용결과

선로조류 지정치	정적해석 모델에 의한 계산결과	안정도해석 모델에 의한 계산결과
$700 + j16.8$	$700 + j16.8$	$700 + j14.4$
$500 + j12.0$	$500 + j12.0$	$500 + j13.5$
$300 + j 7.2$	$300 + j 7.2$	$300 + j 7.6$
$100 + j 2.4$	$100 + j 2.4$	$100 + j 2.4$
$-100 - j 2.4$	$-100 - j 2.4$	$-100 - j 2.4$
$-300 - j 7.2$	$-300 - j 7.2$	$-300 - j 7.7$
$-500 - j12.0$	$-500 - j12.0$	$-500 - j10.0$

5. 결 론

본 논문의 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 논문에서는 정상상태에서의 UPFC 제어효과가 반영된 조류계산 결과를 UPFC 안정도해석을 위한 계통구성으로 변환하는 방법을 제안하고 이를 실계통에 적용하여 그 결과를 검증하였다.
- (2) 이를 위해 UPFC 해석을 위한 조류계산에서의 계통구성과 안정도해석에서의 계통구성을 각각 비교 분석하고 이를 바탕으로 UPFC의 조류계산 결과로부터 UPFC 안정도 해석을 위해 필요한 값들을 계산한 후 UPFC의 안정도해석을 위한 계통을 구성하여 다시 조류계산하는 방법을 사용하였다.
- (3) 제안된 방법에 의한 계통구성 변환시 계통 구성의 차이로 인해 제어선로의 선로조류 무효전력량에 다소의 차이될 보이나 이를 안정도 해석의 초기 값으로 이용하는 데에는 충분한 것으로 사료된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Douglas J. Gotham, G.T.Heydt, "Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp.60-65, February 1998
- [2] Manzar Rahman(M), Mohammed Ahmed(M), Richard Gutman(SM), Robert J.O'Keefe(M), Robert J. Nelson(M), Jianhua Bian(M), "UPFC application on the AEP system : Planning considerations", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 12, No. 4, pp. 1695-1701, November 1997
- [3] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Anderson, "Use of UPFC for optimal power flow control", IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1629-1634, October 1997
- [4] 김학만, 오태규, 장병훈, 추진부, "IPLAN을 이용한 UPFC 안정도 해석 전산 모형", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 119-123, 1998