

UPFC가 계통에 미치는 영향을 선로정수 G,B의 함수로 표현한 새로운 UPFC 정태 해석모델 개발

전동훈\* 김태균\* 추진부\* 김건중\*\*  
\*한전 전력연구원 \*\*충남대학교

The Development of New UPFC Steady-State Model using Transmission Line Constant G, B

D.H.Jeon\* T.G.Kim\* J.B.Chu\* K.J.Kim\*\*  
\*KEPRI \*\*ChungNam Nat'l Univ.

**Abstract** - This paper presents the new unified power flow controller(UPFC) load flow algorithm using UPFC transmission line constant model. The UPFC transmission line constant model represents a function of transmission line constant(G,B) UPFC's effect in power system. It can easily be incorporated in a load flow program. The algorithm is suited for monitoring the power system state as well as determining the magnitude and phase angle of UPFC serial voltage source.

1. 서 론

산업의 고도화에 따라 양질의 전기에 대한 욕구가 높아지고, 전력수요 증가에 상응하여 계통 규모도 증가하고 있으나, 송전계통 확충에 따른 경과지 확보, 이에 소요되는 비용 상승 등으로 적기에 신뢰성있는 계통구성이 어려워져 안정적인 전력공급에 지장을 주는 사례가 빈번하게 발생하고 있다. 양질의 전기를 안정적으로 공급하기 위해서는 이러한 문제의 해결이 필수적인데, 최근 반도체 스위칭 소자를 이용한 유연송전시스템 (FACTS : Flexible AC Transmission System)이 이러한 문제를 해결할 수 있는 대체수단으로써 계통운용에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 평가되어 이에 대한 연구가 활발하게 추진되고 있다.

FACTS는 일반적으로 선로조류를 자유롭게 제어할 수 있는 능력을 가지고 있는데, 지금까지 개발된 FACTS 기기중에서는 선로의 유, 무효전력 조류를 자유롭게 제어할 수 있는 UPFC(Unified Power Flow Controller)가 가장 진보된 기기로 알려져 있다.

이러한 FACTS 기기의 실제통 적용 평가를 위해서는 해석모델과 해석기법의 개발이 매우 중요하다. 최근 몇 년 동안 UPFC에 대해서도 활발한 연구가 진행되어 UPFC의 해석모델과 해석기법에 관련된 논문들이 발표되었다. 그러나, 전력조류해석 분야와 관련된 연구는 상대적으로 미흡하며, 개발된 해석모델과 해석기법들도 대규모 전력계통에 일반적으로 적용하기에는 많은 단점을 가지고 있는 실정이다.

A. Nabavi-Niaki 등은 UPFC의 정태 해석모델을 수학적으로 유도하고, 이를 바탕으로 모선전압의 크기 및 선로의 유,무효전력 조류를 동시에 제어할 수 있는 UPFC 전력조류 해석모델을 제시하였다. 이 모델은 UPFC가 연결되어진 선로의 양단 모선의 타입을 발전기모선과 부하모선으로 변경해 줌으로써 일반적인 조류계산 알고리즘을 이용하여 계통의 상태를 간단히 결정할 수 있지만, UPFC에 의해 제어 가능한 모선전압의 크기, 선로의 유,무효전력 조류에 대한 다양한 조합의 경

우에는 적용할 수 없으며, 또한 UPFC에 의한 직렬 전압원의 전압크기와 위상각을 결정하기 위해서는 별도의 비선형 연립방정식을 풀어야 하는 단점이 있다.

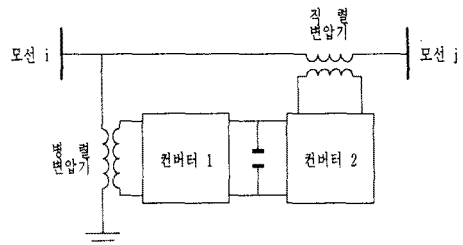
M. Noroozian 등은 UPFC가 계통에 미치는 영향을 직렬전압원의 전압크기와 위상각의 함수로 표현된 부하로 처리한 직렬 전압원 UPFC 해석모델을 개발하고, 일반적인 뉴턴랩스법을 이용한 해석기법을 제시하였다. 이 방법은 일반적인 뉴턴랩스법에 의한 자코비안 행렬을 수정해줌으로서 간단히 계통의 상태를 결정해줄 수 있으나, 이 방법도 UPFC에 의한 직렬 전압원의 전압크기와 위상각을 동시에 결정할 수 없다는 단점이 있다.

C.R. Fuerte-Esquivel 등은 A. Nabavi-Niaki가 유도한 UPFC의 정태 해석모델로부터 모선전력방정식을 유도해내고, 이로부터 일반적인 전력조류계산법의 계통의 상태는 물론 전압원의 크기와 위상각을 동시에 결정할 수 있는 해석기법을 제시하였다.

이에 본 논문에서는 UPFC를 포함한 전력계통에서 모선전압의 크기, 위상각 등 계통상태는 물론 UPFC 직렬 전압원의 크기와 위상각을 동시에 결정할 수 있는 새로운 형태의 UPFC 해석모델과 해석기법을 제시하였다. 이 모델은 UPFC가 계통에 미치는 영향을 기존 선로와 병렬로 연결되는 선로의 정수 G, B의 함수로 등가화한 것인데, 기존의 해석방법과 마찬가지로 일반적인 조류계산의 자코비안 행렬의 수정만으로 간단히 계산되면서도 기존 방법에서는 제시할 수 없었던 UPFC 최적 위치 선정, 경제성 평가 등에 활용할 수 있는 편리한 지표를 제공해준다. 사례연구를 통하여 제시된 방법의 신뢰성을 입증하였다.

2. Unified Power Flow Controller

UPFC는 STATCOM의 직류 링크단과 SSSC의 직류 링크단을 공유시켜 모선전압과 선로의 유, 무효전력 조류를 자유롭게 제어할 수 있게 한 FACTS 기기로서 선로에 직렬과 병렬로 연결되는 두 대의 컨버터와 이들 컨버터가 공유하는 DC 캐패시터로 구성된다. (그림 1)은 UPFC의 기본구성을 보인 것이다.



(그림 1) UPFC의 기본구성

(그림 1)에서 컨버터 1은 공유되어 있는 DC 캐패시터를 통하여 컨버터 2에서 요구되는 유효전력을 공급하는 역할을 한다. 또한 i 모선의 전압크기를 원하는 값으로 제어하기 위해 독립적으로 무효전력을 흡수하거나 공급할 수도 있다. 컨버터 2는 제어 가능한 크기와 위상각을 가진 AC 전압을 선로에 삽입하여 j 모선에서 바라본 i 모선의 전압을 변화시킴으로써 선로의 유효, 무효전력 조류를 변화시키는 AC 직렬 전압원으로 동작한다.

### 3. UPFC 선로정수 모델을 이용한 UPFC 조류계산 알고리즘

UPFC에 의한 선로조류 제어문제를 포함하고 있는 전력조류 해석문제에서는 계통의 상태는 물론 UPFC가 설치되어 있는 i-j 선로의 선로조류를 원하는 값으로 제어하기 위한 직렬 전압원의 크기와 위상각을 동시에 결정할 수 있어야 한다.

이 장에서는 전력조류계산을 위해 UPFC가 계통에 미치는 영향을 선로정수 G, B의 함수로 표현한 새로운 UPFC 해석모델(UPFC 선로정수모델)을 제안하고, 이 모델과 뉴턴합승법을 이용한 UPFC 조류계산 알고리즘을 제시한다. 이 알고리즘은 UPFC를 포함한 계통의 상태는 물론 UPFC 직렬전압원의 크기와 위상각을 간단히 결정할 수 있으며, UPFC가 계통에 미치는 영향이 선로정수의 함수로 표현되기 때문에 UPFC의 최적 위치 선정, 경제성 평가 등에 활용할 수 있는 편리한 자료를 제공해준다.

#### 3.1 i-j 선로조류 제어를 고려한 계통상태 결정

UPFC가 계통에 미치는 영향을 UPFC가 설치되어 있는 i-j 선로에 병렬로 추가되는 선로의 선로정수 G, B의 함수로 모델링하였다.

(그림 2)과 같이 UPFC가 i-j 선로의 선로조류를  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ 로 제어하는 문제는 UPFC 직렬 전압원 모델에서 i-j 선로의 선로조류를  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ 로 제어하기 위한 직렬전압원의 크기와 위상각과 계통상태를 결정하는 문제로 생각할 수 있고, 이를 본 논문에서는 i-j 선로에 병렬로 연결되는 선로가 i-j 선로의 선로조류를  $P_{ij}$ ,  $Q_{ij}$ 로 제어하는 문제로 바꾸어 모델링하였다. (그림 2)로부터 i 모선의 모션전력방정식은 식(1), 식(2)과 같이 유도되고,

$$P_i = V_i^2(G_{ii}^* - G_{ii}) + \sum_{j \neq i} V_i V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) + (j \neq i, j \neq i) V_i V_j \{ (G_{ii}^* + G_{ii}^*) \cos(\delta_i - \delta_j) + (B_{ii}^* + B_{ii}^*) \sin(\delta_i - \delta_j) \} \quad (1)$$

$$= P_i^* - V_i^2 G_{ii}^* + V_i V_j \{ G_{ij}^* \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij}^* \sin(\delta_i - \delta_j) \}$$

$$Q_i = -(B_{ii} - B_{ii}^*) V_i^2 + \sum_{j \neq i} V_i V_j \{ G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \} (j \neq i, j \neq i) + V_i V_j \{ G_{ii}^* + G_{ii}^* \sin(\delta_i - \delta_j) - (B_{ii}^* + B_{ii}^*) \cos(\delta_i - \delta_j) \} \quad (2)$$

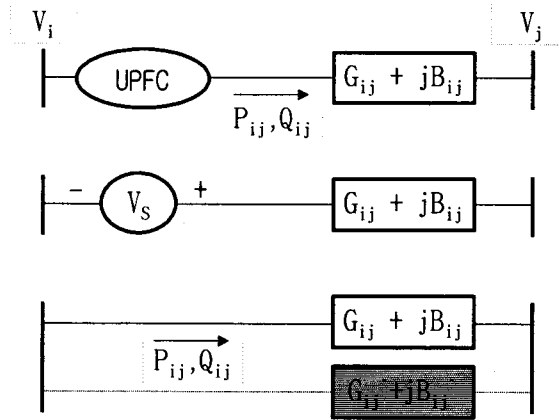
$$= Q_i^* + B_{ii}^* V_i^2 + V_i V_j \{ G_{ij}^* \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij}^* \cos(\delta_i - \delta_j) \}$$

i-j 선로의 선로조류방정식은 식(3)과 같이 유도된다.

$$P_{ij} = -(G_{ij}^* + G_{ij}) V_i^2 + V_i V_j (G_{ij}^* + G_{ij}) \cos(\delta_i - \delta_j) + (B_{ij}^* + B_{ij}) \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3)$$

$$Q_{ij} = -(B_{ij}^* + B_{ij}) V_i^2 + V_i V_j (G_{ij}^* + G_{ij}) \sin(\delta_i - \delta_j) - (B_{ij}^* + B_{ij}) \cos(\delta_i - \delta_j)$$

따라서, 기존 선로에 병렬로 추가되는 선로의 선로정수 G, B로 i-j선로의 선로조류를 제어하는 문제는 i, j 모



(그림 2) UPFC 선로정수 모델

선과 관련된 [ Y ] 행렬과 [ J ] 행렬을 일부 변경하고, [ J ] 행렬의 차원을 다음과 같이 확장함으로써 계통상태는 물론 선로조류를 원하는 값으로 제어하기 위한 선로정수 G, B를 간단히 결정할 수 있다.

$\Delta P$	$\delta P / \delta \theta$	$\delta P / \delta V$	$\delta P / \delta G$	$\delta P / \delta B$	$\Delta \theta$
$\Delta Q$	$\delta Q / \delta \theta$	$\delta Q / \delta V$	$\delta Q / \delta G$	$\delta Q / \delta B$	$\Delta V$
$\Delta P_i$	$\delta P_i / \delta \theta$	$\delta P_i / \delta V$	$\delta P_i / \delta G$	$\delta P_i / \delta B$	$\delta G$
$\Delta Q_i$	$\delta Q_i / \delta \theta$	$\delta Q_i / \delta V$	$\delta Q_i / \delta G$	$\delta Q_i / \delta B$	$\delta B$

#### 3.2 UPFC 상태변수의 결정

UPFC 상태변수인 UPFC 직렬 전압원 모델의 전압원 크기와 위상각은 UPFC가 계통에 미치는 영향을 직렬 전압원의 크기와 위상각의 함수로 표현되는 부하로 처리하는 기존의 UPFC 정태해석 모델을 이용하여 간단히 계산될 수 있다.

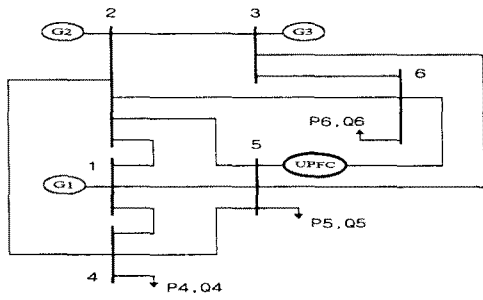
즉, 3.1절에서 제안한 UPFC 조류계산 알고리즘을 통해 계산된 계통상태와 선로정수 G, B를 이용하여 추가되는 선로에 흐르는 선로조류를 계산하여 기존 UPFC 정태해석 모델의 UPFC 부하와 같다고 한 후, 다음과 같은 역행렬 연산을 수행하면 간단히 계산될 수 있다.

$\Delta P_i^*$	$\delta P_i^* / \delta a$	$\delta P_i^* / \delta \gamma$	$\Delta a$
$\Delta Q_i^*$	$\delta Q_i^* / \delta a$	$\delta Q_i^* / \delta \gamma$	$\Delta \gamma$

### 4. 사례연구

UPFC 선로정수 모델을 이용한 새로운 UPFC 조류계산 알고리즘의 신뢰성을 입증하기 위하여 (그림 3)의 6모선 계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

(표1), (표2)는 각각 6모선계통의 선로데이터와 초기 조류계산 데이터를 나타낸 것인데, (표1), (표2)의 데이터를 이용하여 조류계산을 수행한 결과, UPFC가 설치되어 있지 않은 기준 경우(Base Case)에 5-6선로의 6번 모션방향으로의 유효전력 조류는 0.0161(pu), 무효전력 조류는 -0.06749(pu)였다(그림 4).



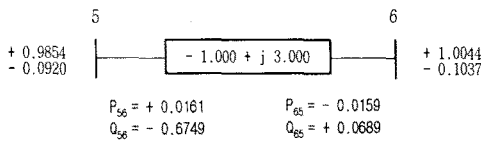
(그림 3) 6모선 계통

(표 1) 6모선 계통의 선로데이터

선로		R	X	C
from	to			
1	2	0.1000	0.2000	0.0200
1	4	0.0500	0.2000	0.0200
2	3	0.0500	0.2500	0.0300
3	5	0.1200	0.2600	0.0250
3	6	0.0200	0.1000	0.0100
4	5	0.2000	0.4000	0.0400
5	6	0.1000	0.3000	0.0300

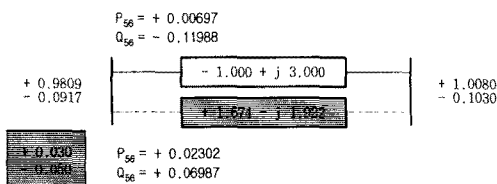
(표 2) 6모선 계통의 초기 조류계산 데이터

모선번호	모선형태	전압(pu)		주입전력	
		크기	위상각	유효전력	무효전력
1	기준	1.05	0.00	0.00	0.00
2	발전기	1.05	0.00	0.50	0.00
3	발전기	1.07	0.00	0.60	0.00
4	부하	1.00	0.00	-0.70	-0.70
5	부하	1.00	0.00	-0.70	-0.70
6	부하	1.00	0.00	-0.70	-0.70



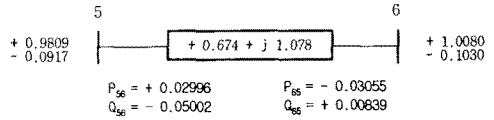
(그림 4) 기준경우의 조류계산결과

먼저 본 논문에서 제시한 UPFC 선로정수 모델을 이용한 UPFC 조류계산 알고리즘을 사용하여 5-6 선로의 유효, 무효전력 조류를 각각 0.03(p.u), 0.05(p.u.)로 제어하고자 하였다. (그림 5)는 조류계산 결과로 기준 선로에 병렬로 추가된 선로의 선로정수는  $G = 1.674$ ,  $B = -1.922$ 였고, 추가된 선로를 통해서 흐르는 유효, 무효 선로조류는 각각 0.02302, 0.06987이었다.



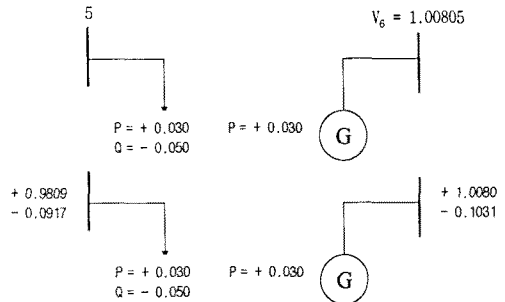
(그림 5) 제시된 방법에 의한 조류계산 결과

다음으로 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 (그림 5)에서 두 선로의 선로정수값을 더한 값을 가지고 동일한 조건에서 일반조류계산을 수행하였다. (그림 6)은 해석 결과를 나타낸 것으로 (그림 5)의 결과와 동일함을 알 수 있다.



(그림 6) 결과검증을 위한 조류계산결과

결과의 신뢰성을 검증하기 위한 다른 방법으로 A. Nabavi-Niaki 등이 제안한 UPFC 조류계산 알고리즘을 이용하여 동일한 조건에서 조류계산을 수행하였다. (그림 7)은 해석결과를 나타낸 것으로 (그림 5), (그림 6)의 결과와 동일함을 알 수 있다.



(그림 7) A. Nabavi-Niaki의 UPFC 조류계산 알고리즘에 의한 해석결과

## 5. 결론

UPFC가 계통에 미치는 영향을 선로정수 G, B의 함수로 표현한 새로운 UPFC 정태해석 모델(UPFC 선로정수 모델)을 개발하고, 이를 이용한 UPFC 조류계산 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘의 특징은 다음과 같다.

- ① 계통의 상태는 물론 선로조류를 원하는 값으로 제어하기 위한 UPFC 직렬 전압원의 크기와 위상각을 동시에 결정할 수 있다.
- ② UPFC 상태변수를 계산하기 위해서 비선형연립방정식을 한번 더 계산하여야 하는 단점이 있으나, 역행렬 연산없이 직접 계산할 수 있어 계산속도면에서 크게 뒤떨어지지 않는다.
- ③ UPFC가 계통에 미치는 영향이 선로정수 G, B로 표시되어 이를 UPFC 최적위치 선정, 경제성 평가 등에 활용할 수 있다.

## (참고 문헌)

- [1] A. Nabavi-Niaki, M. R. Iravani, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies", IEEE Trans. on PS, Vol. 11, No. 4, 1996
- [2] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari, G. Andersson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", IEEE Trans on PD, Vol. 12, No. 4, 1997