

UPFC 모션전력방정식을 이용한 UPFC 정태 해석모델의 유도

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

A UPFC Steady-State Model derived from UPFC Bus Power Equation

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

**Abstract** - This paper presents the new unified power flow controller(UPFC) steady-state model. This is derived from UPFC bus power equations of UPFC Synchronous voltage source model. This is very simple and exact model. This can easily be incorporated in a load flow Program, which is suited for monitoring the power system state as well as determining the magnitude and phase angle of UPFC serial voltage source.

제안한 UPFC 조류계산 알고리즘을 분석, 개선하였는데, 이를 통하여 C.R. Fuerte-Esquivel 등이 제안한 원래의 UPFC 모션전력방정식과 UPFC 조류계산 알고리즘을 충실히 만족하면서도, 시각적으로는 훨씬 단순한 UPFC 정태해석모델을 유도하였다.

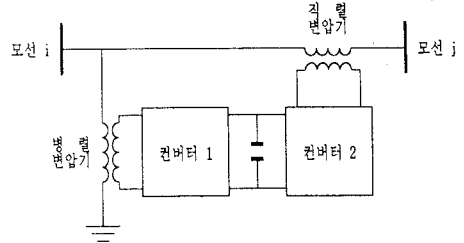
1. 서론

UPFC(Unified Power Flow Controller)는 지금까지 개발된 FACTS 기기중에서 선로의 유, 무효전력 조류를 자유롭게 제어할 수 있는 가장 진보된 기기로 알려져 있다.

2. Unified Power Flow Controller

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

이러한 UPFC의 실제 적용 평가를 위해서는 해석 모델과 해석기법의 개발이 매우 중요하며, 최근 몇 년 동안 이에 대한 활발한 연구가 진행되어 UPFC의 해석 모델과 해석기법에 관련된 논문들이 다수 발표되었다.



(그림 1) UPFC의 기본구성

A. Nabavi-Niaki 등은 UPFC의 정태 해석모델을 수학적으로 유도하고, 이를 바탕으로 모션전압의 크기 및 선로의 유, 무효전력 조류를 동시에 제어할 수 있는 UPFC 전력조류 해석모델을 제시하였다. 이 모델은 UPFC가 연결되어진 선로의 양단 모션의 타입을 발전기모션과 부하모션으로 변경해 줌으로써 일반적인 조류계산 알고리즘을 이용하여 계통의 상태를 간단히 결정할 수 있지만, UPFC에 의해 제어 가능한 모션전압의 크기, 선로의 유, 무효전력 조류에 대한 다양한 조합의 경우에는 적용할 수 없으며, 또한 UPFC에 의한 직렬 전압원의 전압크기와 위상각을 결정하기 위해서는 별도의 비선형 연립방정식을 풀어야 하는 단점이 있다.

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

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

2.1 UPFC 등가회로

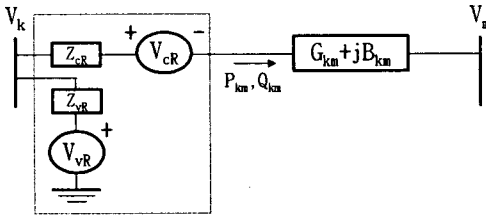
(그림 1)의 UPFC는 UPFC의 손실을 무시하면(정상상태에서 UPFC가 AC 계통에 전력을 공급하지도 흡수하지도 않는다.) (그림 2)와 같이 두 개의 이상적인 전압원으로 이루어진 등가회로로 나타낼 수 있다.

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

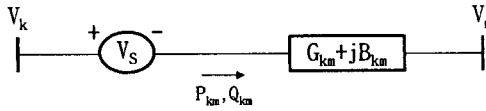
2.2 UPFC 직렬 전압원 모델

(그림 2)의 UPFC 등가회로는 결합 변압기의 임피던스를 무시함으로써 단순화시킬 수 있는데, 이때 UPFC의 병렬 컨버터가 일정 역할에서 운전한다고 가정하여 UPFC를 (그림 3)과 같이 이상적인 직렬 전압원으로 나타낼 수 있다.

본 논문에서는 단순하면서도 정확한 UPFC 정태해석 모델의 개발을 위해 지금까지 개발된 모델중에서 가장 일반적이라 할 수 있는 C.R. Fuerte-Esquivel 등이



(그림 2) UPFC 등가회로



(그림 3) UPFC 직렬 전압원 모델

UPFC 직렬 전압원 모델은 직렬 전압원의 크기와 위상을 이용하여 UPFC와 AC계통 사이에 교환되는 유효무효전력을 자동적으로 제어할 수 있는데, (그림 3) 으로부터 UPFC 모션전력방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

1) k 모션에서

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) - V_k V_s (G_{ks} \cos(\theta_k - \theta_s) + B_{ks} \sin(\theta_k - \theta_s)) \quad (1)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) - V_k V_s (G_{ks} \cos(\theta_k - \theta_s) - B_{ks} \sin(\theta_k - \theta_s))$$

2) m 모션에서

$$P_m = V_m^2 G_{mm} + V_m V_k (G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) + B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)) - V_m V_s (G_{ms} \cos(\theta_m - \theta_s) + B_{ms} \sin(\theta_m - \theta_s)) \quad (2)$$

$$Q_m = -V_m^2 B_{mm} + V_m V_k (G_{mk} \cos(\theta_m - \theta_k) - B_{mk} \sin(\theta_m - \theta_k)) - V_m V_s (G_{ms} \cos(\theta_m - \theta_s) - B_{ms} \sin(\theta_m - \theta_s))$$

여기서,

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= G_{kk} + jB_{kk} = z_{CR}^{-1} \\ Y_{mm} &= G_{mm} + jB_{mm} = z_{CR}^{-1} \\ Y_{km} &= G_{km} + jB_{km} = -z_{CR}^{-1} \\ Y_{mk} &= G_{mk} + jB_{mk} = -z_{CR}^{-1} \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.3 UPFC 직렬 전압원 모델을 이용한 UPFC 조류 계산 알고리즘

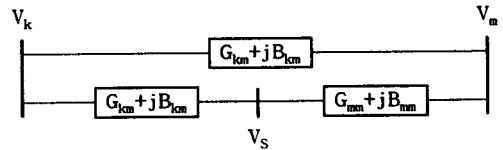
(그림 3)의 UPFC 직렬 전압원 모델로부터 유도된 UPFC 모션전력방정식을 이용한 다음의 UPFC 조류계산 알고리즘은 계통상태는 물론 UPFC 상태변수를 동시에 결정할 수 있다.

$\Delta P$	$\frac{\partial P}{\partial \theta}$	$\frac{\partial P}{\partial V}$	$\frac{\partial P}{\partial V_s}$	$\frac{\partial P}{\partial \theta_s}$	$\Delta \theta$
$\Delta Q$	$\frac{\partial Q}{\partial \theta}$	$\frac{\partial Q}{\partial V}$	$\frac{\partial Q}{\partial V_s}$	$\frac{\partial Q}{\partial \theta_s}$	
$\Delta P_s$	$\frac{\partial P_s}{\partial \theta}$	$\frac{\partial P_s}{\partial V}$	$\frac{\partial P_s}{\partial V_s}$	$\frac{\partial P_s}{\partial \theta_s}$	$\Delta V_s$
$\Delta Q_s$	$\frac{\partial Q_s}{\partial \theta}$	$\frac{\partial Q_s}{\partial V}$	$\frac{\partial Q_s}{\partial V_s}$	$\frac{\partial Q_s}{\partial \theta_s}$	

### 3. UPFC 모션전력방정식을 이용한 UPFC 정태해석모델의 유도

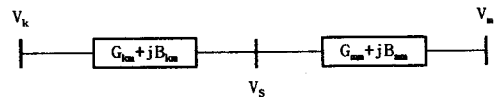
UPFC 직렬 전압원 모델로부터 유도된 식(1),식(2)의 UPFC 모션전력방정식은 각각 세 개의 항으로 구성되어 있다. k 모션과 관련된 UPFC 모션전력방정식에서 첫 번째와 두 번째 항은 k 모션의 모션전력방정식에서 각각 k 모션의 병렬 어드미턴스 및 m 모션과 관련된 성분을 나타내며, 다만 세 번째항이 UPFC의 추가로 인해 생기는 부분임을 알 수 있다. 그런데, UPFC에 의해 추가되는 세 번째항을 두 번째항과 비교해 보면 k 모션의 모션전력방정식에서 가상의 s 모션과 관련된 성분이라고 말할 수 있다. 즉 (그림 4)와 같이 UPFC가 연결된 선로사이에 병렬로 가상모션을 추가하고, 가상모션과 k, m 모션을 연결하는 두 개의 가상선로를 추가하면 UPFC 모션전력방정식의 세 번째항은 k 모션과 s 모션 사이의 선로에 흐르는 조류가 된다. 마찬가지로 m 모션과 관련된 모션전력방정식의 세 번째항도 m 모션과 s 모션 사이의 선로에 흐르는 조류가 된다.

따라서, (그림 3)의 UPFC 직렬 전압원 모델은 식(1),식(2)의 UPFC 모션전력방정식에 의하여 (그림 4)와 같이 등가화 할 수 있다.



(그림 4) 등가화된 UPFC 직렬 전압원 모델

한편 (그림 4)에서 k-s 선로와 s-m 선로의 선로정수를 살펴보면 식(3)의 관계로부터 크기는 같으면서 부호는 반대가 됨을 알 수 있다. 따라서, k-s-m 선로의 선로정수가 0이 되어 k 모션과 m 모션사이의 전력조류는 k-m 선로가 아닌 k-s-m 선로를 통해서만 흐르게 된다. 이러한 관계로부터 (그림 4)의 UPFC 등가모델은 (그림 5)와 같이 간략화될 수 있다.



(그림 5) 보단 간결해진 UPFC 정태해석 모델

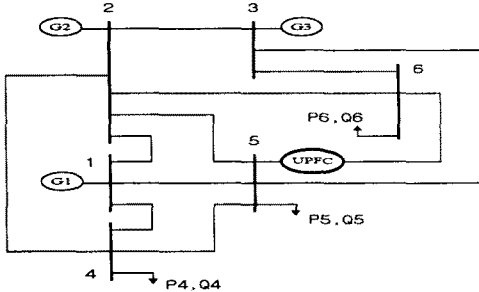
즉 전력계통에서 UPFC는 (그림 5)의 정태해석 모델을 이용하여 사용자가 시각적으로 인식하기 쉽게 등가화될 수 있다. 이때 가상의 S 모션은 UPFC에 의한 직렬 전압원의 크기와 위상각을 가지고, 모션의 유효전력과 무효전력이 0인 부하모션이라고 할 수 있고, s-k 선로의 선로 어드미턴스는 기존 k-m 선로의 (+)어드미턴스값을, s-m 선로의 선로 어드미턴스는 기존 k-m 선로의 (-)어드미턴스값을 가지게 된다. (그림 5)의 UPFC 정태해석 모델은 2.3절에서 언급한 UPFC 조류계산 알고리즘에 쉽게 적용될 수 있으며, 이를 통해서 계통의 상태와 UPFC 상태변수를 쉽게 구할 수 있다.

### 4. 사례연구

본 논문에서 제안한 UPFC 정태해석 모델의 신뢰성

을 입증하기 위하여 (그림 6)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 7).



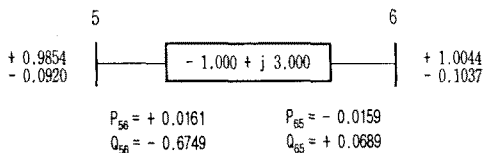
(그림 6) 6모선 계통

(표 1) 6모선 계통의 선로데이터

선	로	R	X	C
from	to			
1	2	0.1000	0.2000	0.0200
1	4	0.0500	0.2000	0.0200
1	5	0.0800	0.3000	0.0300
2	3	0.0500	0.2500	0.0300
2	4	0.0500	0.1000	0.0100
2	5	0.1000	0.3000	0.0200
2	6	0.0700	0.2000	0.0250
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

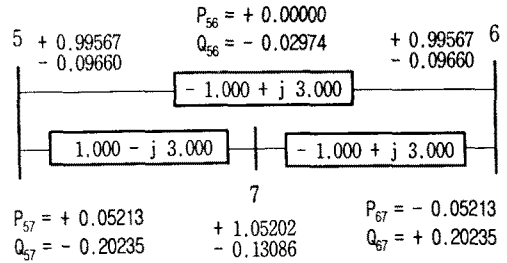
(표 2) 6모선 계통의 초기 조류계산 데이터

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 7) 기준경우의 조류계산결과

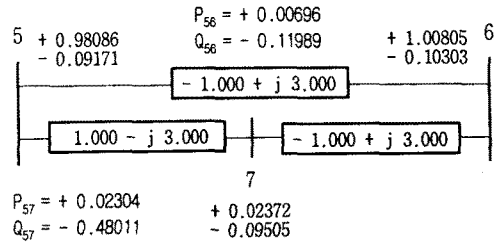
먼저 UPFC가 설치된 전력계통에서 UPFC에 의한 선로조류 제어를 고려하지 않고, 본 논문에서 제시한 UPFC 정태해석모델을 이용하여 조류계산을 수행하였다. (그림 8)은 해석결과를 보인 것이다.



(그림 8) Case 1에 대한 사례연구 결과

(그림8)에서와 같이 UPFC의 설치에 의해 대부분의 조류가 5-7-6 선로로 흘러 5-6선로의 선로조류(특히 유효전력 조류)는 거의 0인 것을 확인하였다.

다음 UPFC가 설치된 전력계통에서 UPFC에 의한 선로조류 제어를 고려하여 본 논문에서 제시한 UPFC 정태해석모델을 이용하여 조류계산을 수행하였다. 이때 5-6 선로의 유효전력 조류는 각각 0.03(p.u.), -0.05(p.u.)로 제어하고자 하였다. (그림 9)는 해석결과를 보인 것이다.



(그림 9) Case 2에 대한 사례연구 결과

(그림 9)에서와 같이 5-6선로의 조류는 거의 0인 반면, 5-7-6선로로 대부분의 조류가 흐르고 있음을 알 수 있으며, 이때 5-6모션사이의 선로조류를 원하는 값으로 제어하는 UPFC 상태변수, 즉 7번 모선의 전압크기와 위상각은 각각 0.02372, -0.09505였다.

## 5. 결론

C.R. Fuerte-Esquivel 등이 제안한 UPFC 직렬 전압원 모델의 UPFC 모션전력방정식을 이용하여 새로운 UPFC 정태해석 모델을 개발하고, 이를 이용한 UPFC 조류계산 알고리즘을 제시하였다. 개발된 모델의 특징은 다음과 같다.

- ① 개발된 UPFC 정태해석 모델은 UPFC 직렬 전압원 모델로부터 유도된 원래의 UPFC 모션전력방정식을 충실히 만족한다.
- ② 개발된 UPFC 정태해석 모델은 지금까지 개발된 어떤 모델보다도 간단 명료한 특징을 가지고 있다. (그림 5)

## (참고 문헌)

- [1] C.R.Fuerte-Esquivel, E.Acha, "Unified Power Flow Controller : a Critical Comparison of Newton-Raphson UPFC Algorithms in Power Flow Studies", IEE, 1997