

직 · 병렬전압원 모델에 의한 UPFC의 전력조류제어에 관한 연구

(A Study on Power Flow Control of UPFC by Series and Shunt Voltage Source Model)

정인학* · 김중신** · 정재길***

(Leen-Hark Jung · Kyoung-Shin Kim · Jai-Kil Chung)

요 약

본 논문에서는 UPFC(Unified Power Flow Controller)설치 전력계통에서 어떤 선로의 전력조류를 원하는 값으로 직접 제어함과 동시에 계통 전체의 전력조류해석을 행하는 선로조류제약을 고려한 전력조류해석 알고리즘을 제시하고 이 알고리즘을 UPFC에 의한 과부하선로의 과부하해소제어에 적용하여 UPFC 제어 방법을 제시하고 사례연구를 통하여 UPFC의 제어효과의 효용성을 입증하였다. 또한 효과적인 조류해석을 위한 UPFC의 직 · 병렬 전압원의 초기치를 설정하는 공식을 유도하였다.

Abstract

In this paper, in the power system having UPFC(Unified Power Flow Controller) Power flow of certain line is controlled to desired value also power flow analysis algorithm is proposed considering power flow constraints which is capable of analysis power flow of all system.

This algorithm is applied to controlling line-overloading problems and the method of is proposed

By applying this algorithm to controlling line-over loading the method of controlling UPFC is proposed and the effectiveness of controlling UPFC is proposed and the effectiveness of controlling UPFC is verified through the research of practical system.

Also, the equation to set up an initial value of series and shunt voltage source of UPFC is proposed for the effective power analysis.

1. 서 론

최근의 전력사업의 세계적 조류를 살펴보면 발전 사업자간의 경쟁 도입, 송전망 운영의 개방 등 상당히 크게 변화하고 있으며, 편리한 에너지 공급원으로 서 전력계통의 중요성에 대한 인식이 높아져 가는

추세이다. 이와 관련하여 세계의 전력계통은 거대한 연계망으로서 성장하고 있으며, 이를 위한 전력계통 기술 기능 역시 크게 발전할 것으로 전망되고 있다.

최근 국내의 전력수요는 매년 10% 이상의 성장률을 기록할 정도로 급속히 증가하고 있어 전력수요를 충족시키기 위해서는 발전소의 추가 건설 및 송전설비의 확충이 시급하다. 이에 따라 최근의 전력계통은 대용량 발전설비의 건설, 송전계통의 대용량화 및 장거리화 등 규모가 커지고 복잡해지고 있으나, 발전설비의 증설과 송전설비의 확충은 경과지 확보문제, 환

*정회원 : 중앙대학교 전기공학과 박사과정 수료
 **정회원 : 중앙대학교 전자전기공학과 박사과정
 ***정회원 : 중앙대학교 전자전기공학부 교수(공박)
 접수일자 : 2000년 10월 20일

경문제 등을 발생시키므로 대단히 어려운 상황이다. 따라서, 새로운 개념의 기기를 개발하여 기존 설비의 이용률을 최대한 증대시키는 것이 보다 효율적이다. 이를 위한 방안으로 급속히 발전하는 전력전자기술과 고속·정밀제어기술을 이용하여 교류송전에 관련된 독립변수 등을 신속·정확하게 조절하여 선로의 유·무효전력을 제어하는데 유연성을 갖도록 구성된 교류송전시스템인 유연송전시스템(FACTS : Flexible AC Transmission System)이다[1,2]. FACTS는 80년대 말경에 미전력연구원(EPRI : Electric Power Research Institute)에 의해 처음 연구가 시작되었다. 초기에는 FACTS기기로 수동소자와 싸이리스터 스위치를 결합한 방식이 추진되었으나 최근 대전력 GTO 싸이리스터가 양산되면서 이것을 이용한 전압원 인버터 방식이 보편화되고 있다. 이 GTO 싸이리스터를 이용한 FACTS기기로는 선로에 병렬로 연결되어 모선의 전압안정도를 유지하고 선로의 전송용량을 증대하는 기능을 갖는 정지형동기보상기(STATCOM : Static Synchronous Compensator)와 STATCOM과 동일한 구조를 갖고 선로와 직렬 연결되어 선로의 리액턴스를 조절하여 전송용량을 제어하는 기능을 갖는 정지형동기직렬보상기(SSSC : Static Synchronous Series Compensator) 등이 있다. STATCOM과 SSSC의 직류링크단을 공유시켜 선로로 전송되는 무효전력뿐만 아니라 유효전력도 총체적으로 보상 가능한 FACTS기기가 제안되었는데, 이것이 일체형조류제어기(UPFC : Unified Power Flow Controller)이다[3,4,5]. UPFC는 이론상으로 유·무효전력뿐만 아니라 적용할 수 있는 전압크기제어가 가능하다. 동작제한이 없다고 가정한다면, UPFC는 이제 가지 변수를 동시에 또는 이 변수들의 어떠한 조합도 제어할 수 있다, 또 UPFC는 위상각·전압·선로 임피던스를 종합적으로 제어할 수 있다는 점에서 원리적으로는 현재 전력조류제어에 가장 포괄적이고 효과적인 FACTS 설비로 생각할 수 있다[4]. UPFC를 제어하고 운용하기 위한 정상상태 해석을 위해서는 전력조류계산이 필수적이다. 이전에 제안된 UPFC의 조류계산모형으로는 분리모델, 주입모델 등이 있다. 분리모델은 간단하며 기존의 조류계산 프로그램을 그대로 이용할 수 있다는 장점이 있으나 UPFC가 전압크기 및 유·무효전력을 동시에 제어할 때만 적용 가능하며 만약, 하나 또는 두 변수만을 제

어하고자 하는 경우에는 이 모형을 적용할 수 없다. 또한, UPFC의 변수는 조류계산이 수렴된 뒤 계산되기 때문에 UPFC변수의 제한 값 초과 여부를 조류계산 중에 확인할 수 없다는 단점이 있다[6]. 주입모델은 UPFC의 주입전력을 고려하여 자코비안 행렬을 수정함으로써 기존의 전력조류계산 프로그램에 제시된 모형을 용이하게 포함시킬 수 있으나, 원하는 전력조류를 얻기 위해서 주입전압의 크기를 가정하고, 위상각의 제어범위만큼 프로그램을 실행한 후 원하는 전력조류에 맞는 전압크기와 위상각을 알 수 있다는 단점이 있다[3]. 따라서, 본 논문에서는 선로전력조류를 먼저 제약하여, 원하는 전력조류에 의해 UPFC의 직·병렬전압원의 전압크기 및 위상이 변화하도록 하는 직·병렬전압원 모델을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제시한 직·병렬전압원 모델은 직·병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화하고, 추가된 모선의 전압과 직렬전압원의 전압으로 전력조류를 계산하여 전력조류에 따른 직·병렬전압원의 전압크기와 위상각의 변화를 확인함으로써 UPFC의 전력조류제어의 효용성을 입증하고자 한다. 또, 직·병렬전압원의 전압크기 및 위상각의 초기치에 따른 수렴속도의 변화를 확인하여 알맞은 초기치 공식을 보이고, 병렬컨버터가 voltage regulator로도 동작할 수 있어, 불안정한 모선전압을 조정할 수 있으며, 직렬컨버터와 병렬컨버터간의 유효전력흐름을 제어할 수 있으므로 실계통 투입시 정확하고 신뢰있는 전력조류계산이 용이하고, 직렬전압원의 전압크기 및 위상각에 대한 유·무효전력조류의 관계식을 구할 수 있으므로, 주입 전압의 크기나 위상각을 가정하지 않고 원하는 유·무효전력조류에 따른 직·병렬전압원의 전압크기와 위상각을 직접 구할 수 있다. 직·병렬전압원 모델은 직접 선로에 흐르는 유·무효전력조류를 제어할 수 있기 때문에 UPFC가 설치된 선로에 과부하가 생기는 경우 발전기의 출력을 증가 또는 감소시키지 않고 과부하선로의 유·무효전력조류를 감소시켜 선로의 과부하를 해소시킬 수 있다.

본 논문에서 초기치에 따른 수렴속도의 변화와 전력조류에 따른 직·병렬전압원의 전압크기 및 위상각의 변화를 확인하고, 선로과부하시 UPFC를 통한 전력조류를 제어함으로써 선로과부하가 해소됨을 보여 전력조류제어의 효용성을 입증하고자 한다.

2. UPFC (Unified Power Flow Controller)

2.1 UPFC의 구성

UPFC는 선로에 걸리는 전압을 임의의 크기와 위상을 갖도록 신속하게 제어하여 선로로 전송되는 유·무효전력을 총체적으로 보상하는 기능을 갖는다. 따라서, 정상상태 및 과도상태의 전력조류를 제어하는데 효과적이다. 또한, 보상에 필요한 무효전력을 내부적으로 공급하기 때문에 송전선로의 어떤 지점에나 설치 가능하고 전력계통의 확장이나 변경에 관계없이 운용 가능하다.

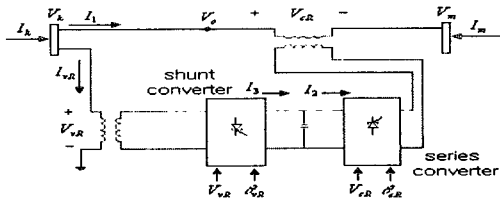


그림 1. UPFC의 개념도
Fig. 1. UPFC schematic diagram

UPFC는 그림1에 보인 바와 같이 2개의 전압원 컨버터가 하나의 직류 커패시터를 공유해 링크되어 있다. 기능상 컨버터 하나는 송전선로와 병렬로 그리고 다른 하나는 선로와 직렬로 연결되어 있다. 병렬 컨버터의 주요 기능은 직렬컨버터에서 필요로 하는 유효전력을 전력계통으로부터 흡수하여 직류링크를 통해 공급하는 것이다. 병렬컨버터는 선로에 유효전력을 공급할 뿐만 아니라 동시에 병렬로 연결된 모선의 무효전력을 조절하는 기능도 한다. 직렬컨버터는 계통과 동일한 주파수의 교류전압을 선로에 직렬로 주입하는 기능을 갖는다. 이때 주입전압의 위상각은 임의로 조정 가능하고, 주입전압 V_{cr} 의 크기는 최대 한계치 내에서 직류 링크전압과 직렬컨버터의 변조율에 의해 결정된다.

3. 직 · 병렬전압원 모델

3.1 직 · 병렬전압원 모델의 등가회로

그림2에서는 두 개의 이상적인 전압원을 사용하여 등가회로를 나타내고 있다.

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

$$\overline{V}_{cR} = V_{cR}(\cos \theta_{cR} + j \sin \theta_{cR}) \quad (2)$$

그림처럼 직 · 병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화하여 추가된 모선M의 모선전압과 직 · 병렬전압원으로 전력조류를 제어하도록 구성되어 있다.

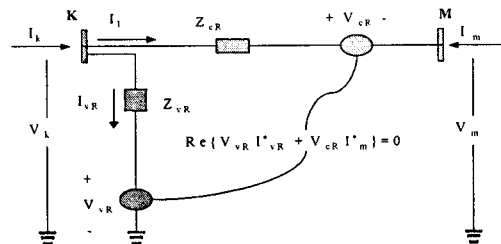


그림 2. 일체형조류제어기의 등가회로
Fig. 2. equivalent circuit of UPFC

3.2 직 · 병렬전압원의 전력방정식

복소전력방정식은 다음과 같이 수식화된다.

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

따라서, Fig.2에서의 각 모선의 전력방정식은 모선 K에서,

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

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

여기서 $\delta_{km} = \delta_k - \delta_m$, $\delta_{kcR} = \delta_k - \delta_{cR}$, $\delta_{kvR} = \delta_k - \delta_{vR}$ 모선 M에서,

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

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

여기서, $\delta_{mk} = \delta_m - \delta_k, \delta_{kcR} = \delta_k - \delta_{cR}$

다음처럼 보상선로의 전력방정식을 구할 수 있다.

여기서, 각 어드미턴스는 다음처럼 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_{kk} &= Y_{kk}(\cos \theta_{kk} + j \sin \theta_{kk}) = Z_{cR}^{-1} + Z_{vR}^{-1} \\ Y_{mm} &= Y_{mm}(\cos \theta_{mm} + j \sin \theta_{mm}) = Z_{cR}^{-1} \\ Y_{km} &= Y_{mk} = Y_{km}(\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) = -Z_{cR}^{-1} \\ Y_{vR} &= Y_{vR}(\cos \theta_{vR} + j \sin \theta_{vR}) = -Z_{vR}^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

보상선로와 직렬컨버터간의 전력수급은 $\overline{V_{cR}} \overline{I_m}^*$ 로 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 유·무효전력조류이므로, 다음식에 의해서 m과 k 모선사이에 흐르는 전력조류를 구할 수 있다.

$$P_{mk} + jQ_{mk} = (\overline{V_{cR}} + \overline{V_m}) \overline{I_m}^* \quad (9)$$

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

$$P_{vR} + P_{cR} = 0 \quad (10)$$

이며, 이 수식이 전력오차(Power mismatch)를 나타내고, 자코비안 행렬에 추가되는 부분이다.

3.3 Jacobian행렬의 수정

Newton-Raphson법을 이용한 전력조류계산식은

$$[f(x)] = [J][\Delta X] \quad (11)$$

$[f(x)]$ 의 각성분은 다음과 같다.

$$[f(x)] = [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_k \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \quad (12)$$

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

$$[\Delta X] = [\Delta \delta_k \Delta \delta_m \Delta V_{vR} \Delta V_m \Delta \delta_{cR} \Delta V_{cR} \Delta \delta_{vR}]^T \quad (13)$$

Jacobian 행렬은 다음과 같다.

$$[J] = \begin{bmatrix} \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{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}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

3.4 직·병렬전압원 모델의 초기조건

직·병렬전압원 모델에서 초기조건에 많은 영향을 받는다. 프로그램의 반복수가 증가하는 경우도 있고, 심지어 수렴을 하지 못하고 발산하는 경우도 있기 때문에 계통에 알맞은 초기조건이 필요하다.

3.4.1 직렬전압원의 초기조건

직렬전압원의 초기조건은 식(6)과 식(7)을 이용하여 구할 수 있으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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.

3.4.2 병렬전압원의 초기조건

병렬전압원의 전압크기의 초기조건은 병렬컨버터의 동작특성에 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 P_{cR} 과 P_{vR} 의 전력방정식을 구한 후 식(11)에 대입하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 수식화할 수 있다.

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

X_{vR} 은 병렬전압원의 inductive reactive이고, 첨자 0은 initial value를 나타낸다.

3.5 병렬컨버터의 동작특성 및 설치모선에 따른 자코비안행렬의 수정

3.5.1 설치모선이 발전기모선일 경우

발전기모선은 PV 지정모선이므로, Q값은 계산에 의해 구해지며, 전압의 크기는 일정한 값으로 고정되므로, ΔQ_k 항을 포함시키지 않는다. 이 경우 병렬전압원의 전압 크기는 일정한 값으로 고정된다.

$$\begin{aligned} [f(x)] &= [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \\ [\Delta X] &= [\Delta \theta_k \Delta \theta_m \Delta V_m \Delta \theta_{cr} \Delta V_{cr} \Delta \theta_{vr}]^T \end{aligned} \quad (19)$$

3.5.2 설치모선이 부하모선일 경우

설치모선이 부하모선일 경우는 다시 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작할 경우와 voltage regulator로 동작하지 않을 경우로 나뉘어진다.

(1) 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작할 경우
설치 모선K의 전압크기는 병렬컨버터에 의해 일정한 전압크기로 고정되므로, 모선K의 전압크기는 Jacobian행렬에 포함되지 않으며, 병렬전압원의 전압 크기는 매 반복시 값이 변화된다. 따라서, ΔQ_k 항은 ΔV_{vR} 와 대응한다.

$$\begin{aligned} [f(x)] &= [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_k \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \\ [\Delta X] &= [\Delta \theta_k \Delta \theta_m \Delta V_{vR} \Delta V_m \Delta \theta_{cr} \Delta V_{cr} \Delta \theta_{vr}]^T \end{aligned} \quad (20)$$

(2) 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작하지 않는 경우

설치 모선K의 전압크기는 매 반복시 값이 변화하고, 병렬전압원의 크기는 일정한 전압크기로 고정된다. 따라서, ΔQ_k 항은 ΔV_k 와 대응하게 된다.

$$\begin{aligned} [f(x)] &= [\Delta P_k \Delta P_m \Delta Q_k \Delta Q_m \Delta P_{mk} \Delta Q_{mk} \Delta P_{bb}]^T \\ [\Delta X] &= [\Delta \theta_k \Delta \theta_m \Delta V_k \Delta V_m \Delta \theta_{cr} \Delta V_{cr} \Delta \theta_{vr}]^T \end{aligned} \quad (21)$$

병렬컨버터가 voltage regulator로 동작할 수 있는 이유는 무효전력을 발전 또는 흡수할 수 있기 때문이며, 발전 또는 흡수된 무효전력량에 의해 모선 전압을 제어할 수 있다.

4. 사례연구

본 논문에서는 제시한 조류계산모델을 2기 5모선 계통인 Hale Network에 적용하여 조류계산을 실행했다. Hale Network의 계통도와 선로정수는 [부록]의 표15와 그림5와 같다.

4.1 UPFC 미설치시 전력조류계산

UPFC를 설치하지 않을 경우 전압크기와 위상각 및 선로의 조류계산결과를 나타내면 표 1, 2와 같다.

표 1. 정상상태시 모선출력
Table 1. Bus output for steady-state

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(p.u.)	Q(p.u.)
1	1.0600	0.0000	1.3113	0.9081
2	1.0000	-2.0612	0.1999	-0.7159
3	0.9872	-4.6367	-0.4500	-0.1500
4	0.9841	-4.9570	-0.4000	-0.0500
5	0.9717	-5.7649	-0.6000	-0.1000

표 2. 정상상태시 전력조류결과
Table 2. Result of power flow for steady-state

Line		Power at bus & Load flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	89.3362	73.9938
	3	41.7918	16.8208
2	3	24.4724	-2.5176
	4	27.7128	-1.7229
	5	54.6596	5.5599
3	4	19.3816	2.8654
4	5	6.5983	0.5185

4.2 UPFC의 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작할 경우 전력조류제어 및 전력조류계산

UPFC의 설치구간은 모선3과 모선4사이의 선로에 설치하고 UPFC의 직렬 변압기의 리액턴스와 병렬 변압기의 리액턴스를 모두 $X_{cR} = X_{vR} = 0.1 [p.u.]$ 로 하고 병렬컨버터는 voltage regulator로 동작하도록 하였다. 전력조류의 주제어대상은 모선3과 모선4사이의 선로의 유·무효전력으로서 유효전력조류는 30[MW]무효전력조류는 2 [Mvar]로 제한하는 것으로 가정하였다. 이 경우 초기조건은 식(15)~(18)에 의하여 병렬전압원의 전압크기 및 위상각은 1[p.u.], 0° 이고, 직렬전압원의 전압크기 및 위상각은 0.03[p.u.], -86.19° 로 취하였으며, 조류제어시 계산결과는 표 3~표5와 같다. 모선6은 UPFC 설치시 추가되는 모선이며, 이 모선은 부하모선으로 간주하고 부하는 유·무효전력은 모두 0[p.u.]이다.

표 3. UPFC 설치 후 모선출력
Table 3. Bus output of system with UPFC

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.0600	0.0000	131.8483	85.3727
2	1.0000	-1.9225	20.0000	-82.6858
3	1.0000	-5.4649	-45.0000	-15.0000
4	0.9886	-4.0894	-40.0000	-5.0000
5	0.9734	-5.3791	-60.0000	-10.0000
6	0.9927	-3.5922	0.0000	0.0000

표 4. 직·병렬전압원의 출력
Table 4. Output of Series and Shunt Voltage Source

$V_{cR}(p.u.)$	$\delta_{cR}(deg.)$	$V_{vR}(p.u.)$	$\delta_{vR}(deg.)$
0.0626	-90.9489	1.0156	-5.4835

여기서 V_{cR}, V_{vR} : 직·병렬전압원의 전압크기
 δ_{cR}, δ_{vR} : 직·병렬전압원의 위상각

표5의 결과를 계통도와 함께 나타내면 그림3과 같다.

4.3 UPFC의 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작하지 않을 경우 전력조류제어 및 전력조류계산
전과 동일한 조건에서 병렬컨버터가 voltage reg

표 5. 전력조류계산결과
Table 5. Load flow result

Line		Power at bus & Load flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	85.4395	75.1438
	3	46.4088	10.2289
2	3	31.2122	-11.3428
	4	20.7112	-2.1625
	5	51.1194	5.1424
3	6	30.3295	-13.6791
4	5	10.0334	0.5833
	6	-29.5796	-4.5634
6	3	-30.0000	-1.9998
	4	30.0000	1.9998
2	1	-83.0428	-74.3246
3	1	-44.7543	-10.5744
	2	-30.5753	9.2535
4	2	-20.4538	-1.0199
5	2	-50.0565	-4.8747
	4	-9.9435	-5.1253

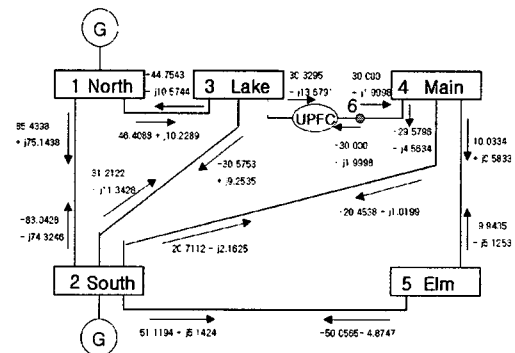


그림 3. 시험 계통과 전력조류
Fig. 3. Test network and Load flow

ulator로 동작하지 않도록 하였을 경우 조류제어시 계산결과는 표6~표8과 같다. 표6~표8은 각각 전력조류, 모선출력, 직·병렬전압원의 출력을 나타내고 있다. 병렬컨버터가 voltage regulator로 동작하는 경우와 동작하지 않는 경우를 비교하면, 표3과 표6에서 나타나듯이 voltage regulator동작할 경우 UPFC를 설치한 모선의 전압이 1로 고정되지만, voltage regulator로 동작하지 않을 경우는 0.9920으로 전압이 고정되지 않은 값으로 나온다. 또, 병렬전압원의 전압크기도 voltage regulator로 동작할 경우

는 1.0156으로 나오지만 voltage regulator로 동작하지 않을 경우는 1로 고정된다.

표 6. 전력조류계산결과
Table 6. Load flow result

Line		Power at bus & Line flow	
From	To	P(MW)	Q(Mvar)
1	2	85.1579	75.2273
	3	46.2041	13.7064
2	3	31.1902	-6.9861
	4	20.5428	-2.1653
	5	51.0345	5.1363
3	6	30.0810	-5.9723
	5	10.1162	0.5821
4	6	-29.8267	-4.5522
	3	-30.0000	-2.0004
6	4	30.0000	2.0004
	1	-82.7675	-74.4268
3	1	-44.4899	-13.8331
	2	-30.5916	4.8137
4	2	-20.2895	-1.0299
5	2	-49.9751	-4.8792
	4	-10.0249	-5.1208

표 7. 모선출력
Table 7. Bus output

Bus	V(p.u.)	Angle(deg.)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1.0600	0.0000	131.3620	88.9337
2	1.0000	-1.9125	20.0000	-78.4419
3	0.9920	-5.3299	-45.0000	-14.9917
4	0.9887	-4.0616	-40.0000	-5.0000
5	0.9734	-5.3631	-60.0000	-10.0000
6	0.9928	-3.5602	0.0000	0.0000

표 8. 직·병렬전압원의 출력
Table 8. Output of series and shunt voltage source

V_{cR} (p.u.)	δ_{cR} (deg.)	V_{vR} (p.u.)	δ_{vR} (deg.)
0.0610	-98.3900	1.0000	-5.3345

4.4 과부하해소 효과

계통도 및 선로정수는 4.1과 4.2의 사례와 같으며, 모든 선로는 2회선 선로로 가정하며, 최대선로정격용량은 정상운전시 선로조류의 150%로 가정한다.

4.4.1 정상운전시의 1회선선로의 전력조류

(1) 정상운전시의 전력조류

표 9. 정상상태시의 1회선당 전력조류
Table 9. Load flow per one-line for steady-state

From	To	P(MW)	Line Capacity
1	2	44.668	67.002
	3	20.896	31.344
2	3	12.236	18.354
	4	13.856	20.784
	5	27.330	40.995
3	4	9.693	14.539
4	5	3.299	4.949
Total Loss		6.122	

표9는 정상시의 1회선당 흐르는 전력조류 나타낸 것이다.

(2) 선로 1회선 개방고장시 전력조류 및 과부하율

각각의 선로가 1회선 개방고장이라고 가정하고, load flow 프로그램을 실행하여 각 경우, 즉 모선1-2간 선로, 모선1-3간 선로, 모선2-3간 선로, 모선2-4간 선로, 모선2-5간 선로, 모선3-4간 선로, 모선4-5간 선로의 1회선 고장시 선로의 유효전력조류 및 과부하율을 산출했다. 여기서는 선로가 1회선 개방고장시 과부하율이 가장 큰 모선3-4간 선로의 경우만을 나타내면 표10과 같다.

표 10. 3-4 모선간 선로 개방시 전력조류
Table 10. Load flow for line open between bus3 and bus4

From	To	P(MW)	Line Capacity	Overloading
1	2	45.076	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
	5	27.678	40.995	67.515
3	4	17.441	14.539	119.960
4	5	2.964	4.949	59.890
Total Loss : 6.154			단위 : MW	단위 : %

선로의 과부하율이 약 120%로 다른 선로의 경우보다 컸다. 따라서, UPFC를 모선3-4간 선로에 설치하는 것이 가장 효율적이라 생각되었다.

4.4.2 과부하 해소

모선3-4간의 선로에 설치한 UPFC에 의하여 이 선로의 유효전력조류는 최대선로용량인 14.539[MW]로, 무효전력조류는 정상운전시 전력조류인 1.4327[Mvar]로 제한되도록 제어한다. 모든 초기값은 정상시와 같은 초기값을 사용하지만, 직·병렬전압원의 초기값은 초기공식에 의해서 변화된 값을 사용한다. 모선3-4간 선로의 UPFC제어에 의한 전력조류계산 및 과부하해소결과는 표 11과 같다.

표 11. UPFC제어에 의한 선로조류결과
Table 11. Load flow result by UPFC control

From	To	P(MW)	Line-Capacity	Overloading
1	2	45.7688	67.002	68.3096
	3	20.0170	31.344	63.8623
2	3	10.6699	18.354	58.1339
	4	15.5970	20.784	75.0433
	5	28.2323	40.995	68.8677
3	6	14.7822		
4	5	2.4302	4.949	49.1049
	6	-14.253		
6	3	-14.539		
	4	14.539	14.539	100
Total Loss		6.5716	단위 : MW	단위 : %

표 12. 유효전력에 따른 직렬전압원의 변화
Table 12. Variation of series voltage source for active power

P(p.u.)	V(p.u.)	Angle(deg.)
0.15	0.0172	-27.9596
0.16	0.0184	-39.5505
0.17	0.0203	-49.3975
0.18	0.0226	-57.4326
0.19	0.0253	-63.8877
0.20	0.0282	-69.0739
0.21	0.0313	-73.2751
0.22	0.0346	-76.7192
0.23	0.0379	-79.5797
0.24	0.0413	-81.9863
0.25	0.0448	-84.0358
0.26	0.0483	-85.8011
0.27	0.0518	-87.3372
0.28	0.0554	-88.6865
0.29	0.0590	-89.8818
0.30	0.0626	-90.9489

4.5 전력제어에 따른 UPFC전압원의 변화

UPFC의 설치구간은 4.2와 동일하다. 무효전력을 2[Mvar]로 고정시키고 유효전력을 15~30[MW]까지 변화시키면서 조류제어에 따른 직렬전압원의 전압크기 및 위상각의 변화를 나타내면 표 12와 같으며 이 관계를 그래프로 표시하면 그림 4와 같다.

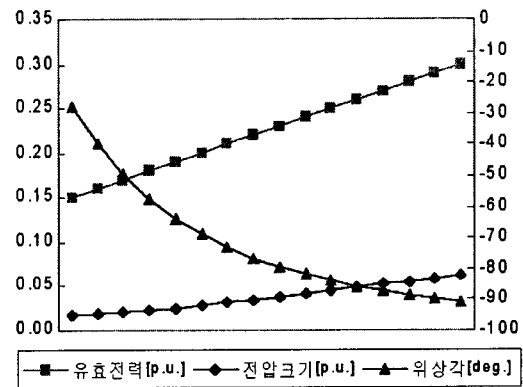


그림 4. 유효전력제어에 따른 직렬전압원의 변화 곡선
Fig. 4. Graph of variation of series voltage source for active power

표 13. 무효전력에 따른 직렬전압원의 변화
Table 13. Variation of series voltage source for reactive power

Q(p.u.)	V(p.u.)	Angle(deg.)
0.001	0.0633	-88.6973
0.002	0.0626	-90.9489
0.003	0.0620	-93.2515
0.004	0.0616	-95.5993
0.005	0.0612	-97.9857
0.006	0.0609	-100.4033
0.007	0.0607	-102.8442
0.008	0.0606	-105.2998
0.009	0.0607	-107.7614
0.010	0.0608	-110.2200

유효전력을 30[MW]로 고정시키고 무효전력변화에 따른 직렬전압원의 변화를 나타내면 표 13과 같고 이 관계를 그래프로 나타내면 그림 5와 같다.

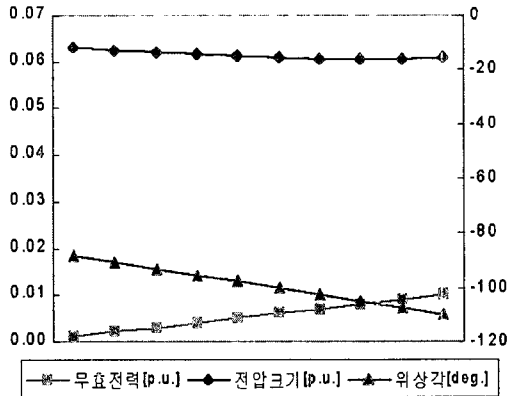


그림 5. 무효전력제어에 따른 직렬전압원의 변화 곡선
 Fig. 5. Graph of variation of series with reactive power

4.6 초기치에 따른 수렴속도비교

초기치에 따라 수렴속도의 차이를 비교하여 초기치가 조류계산프로그램에 미치는 영향을 확인한 결과는 표14와 같다.

표 14. 초기치에 따른 영향
 Table 14. Effect of initial conditions

$V_{cr}[p.u]$	$\delta_{cr}(deg)$	iteration
0.01	180.0	9
0.02	180.0	14
0.02	0.0	10
0.03	-85.94	5

하지만, 병렬전압원의 전압 크기 및 위상각의 초기치는 조류계산프로그램에 거의 영향을 미치지 않았다.

5. 결론

본 논문은 FACTS(Flexible AC Transmission System)기기 중 가장 포괄적이며, 효과적인 UPFC를 송전선로에 설치 후 선로의 전력조류를 해석하고, 제어하는 기법을 제시하였으며, 선로과부하 발생시 UPFC의 선로과부하 해소효과를 보였고, 병렬컨버터의 동작특성에 따른 전력조류해석 및 제어기법을 제시했다. 본 논문에서 제시한 직·병렬전압원 모델은 직·병렬컨버터를 두 개의 전압원으로 등가화하고,

추가된 모선의 전압과 직렬전압원의 전압제어에 의하여 전력조류를 제어·해석하는 전력조류계산모형을 유도하였다. 본 논문에서 제시한 직·병렬전압원 모델을 2기 5모선 계통인 Hale Network에 적용하여 각종 전력조류를 해석하였다. UPFC 설치하지 않은 계통의 전력조류와 UPFC를 설치한 계통의 전력조류를 비교하여 전력조류변화를 확인함으로써 원하는 전력조류를 얻을 수 있음을 보였다. 유·무효전력조류제어에 따른 직·병렬전압원의 전압크기와 위상각의 변화를 확인하고, 2회선 선로 중 1회선선로 개방 고장시 고장선로에 UPFC를 설치하여 그 선로의 최대선로용량이하의 전력조류로 제어하여 고장선로의 과부하율을 100%이하로 해소할 수 있음을 보임으로써 UPFC의 전력조류제어의 효용성과 신뢰성을 입증하였다. 또, 초기치공식에 의해 구한 직·병렬전압원의 초기치에 대한 수렴속도와 임의의 초기치에 대한 수렴속도를 비교하여, 초기치가 전력조류계산프로그램에 미치는 영향을 확인했다. 병렬컨버터는 unity power factor로 또는 voltage regulator로도 동작하도록 제어 가능하므로, UPFC의 직·병렬컨버터간의 무효전력흐름을 제어할 수 있어, UPFC의 병렬컨버터가 설치된 모선의 전압을 제어할 수 있음을 확인했다. 주입모델에서는 원하는 전력조류를 얻기 위해서는 주입전압의 크기를 가정하고, 주입전압의 위상각을 $0^\circ \sim 360^\circ$ 까지 전력조류계산을 한 후 원하는 전력조류를 얻기 위한 주입위상각을 구할 수 있으나, 본 논문에서 제시한 조류계산모델은 전력조류를 제어변수로 사용하여, 원하는 전력조류에 대한 직·병렬전압원의 전압크기와 위상각을 얻을 수 있으므로, 구해진 전압크기와 위상각으로 전력조류를 바로 제어할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) 한국전기연구소, "FACTS에 의한 송배전 계통의 용량증대 기술 개발", 1998년 8월.
- (2) 한국전기연구소, "FACTS 엔지니어링 기술분석", 1998년 8월.
- (3) L. Gyugui, " Unified Power-Flow Concept for Flexible AC Transmission Systems", IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 4, pp. 323-331, July 1992.
- (4) C. R. Fuerte-Esquivel, et al, "UPFC: a Critical Comparison of Newton-Raphson Algorithms in Power Flow Studies", IEE Proc.-Gener. Distrib., Vol. 144, No. 5, pp. 437-444, September 1997.

직·병렬전압원 모델에 의한 UPFC의 전력조류제어에 관한 연구

- [5] 김태현, "UPFC의 정상상태 해석과 최적 전압운용에의 적용", 서울대 박사학위 논문, 1999년 2월.
- [6] A. Nabavi-Niaki, et al, "Steady-State and Dynamic Models of UPFC for Power System Studies", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 11, No. 4, pp. 1937-1943, November 1996.
- [7] N. Hingorani, "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, Vol. 30, No. 4, pp. 40-45, April 1993.
- [8] L. Gyugyi, et al, "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp. 1085 -1093, April 1995.
- [9] M. Noroozian, et al, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1629-1633, October 1997.
- [10] B. T. Ooi, et al, "Mid-Point Siting of FACTS Devices in Transmission Lines", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 12, No. 4, pp. 1717-1722, October 1997.
- [11] G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill, 1968.
- [12] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1998.

◇ 저자소개 ◇

정 재 길 (鄭在吉)

1936년생. 1962년 3월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1973년 2월 서울대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 1984년 2월 숭실대학교 전자공학과 대학원 졸업(박사). 1974년 3월~현재 중앙대학교 공과대학 전자전기공학부 교수.

정 인 학 (鄭麟學)

1963년생. 1986년 2월 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1988년 8월 중앙대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2000년 2월 중앙대학교 전기공학과 대학원 수료(박사). 1996년 2월~현재 인천기능대학 전기계측제어과 조교수.

김 경 신 (金京信)

1974년생. 1997년 8월 중앙대학교 전기공학과 졸업. 2000년 8월 중앙대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2001년3월~현재 중앙대학교 전기공학과 대학원 재학(박사).

부 록

다음은 Hale Network의 기본계통도와 선로정수이다.

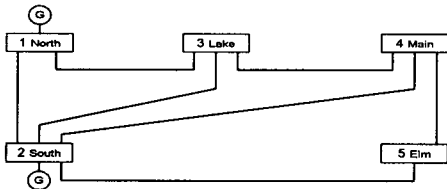


그림 5. Hale Network 계통도
Fig. 3. Hale Network system diagram

표 15. 선로 정수
Table 15. Line integer

Line	Name		Z [p.u.]		C [p.u.]
	From	To	R	X	Y/2
1	①North	②South	0.020	0.060	0.030
2	①North	③Lake	0.080	0.240	0.025
3	②South	③Lake	0.060	0.180	0.020
4	②South	④Main	0.060	0.180	0.020
5	②South	⑤Elm	0.040	0.120	0.015
6	③Lake	④Main	0.010	0.030	0.010
7	④Main	⑤Elm	0.080	0.240	0.025

C : 선로 정전 용량