

## The Enhancement of Power System Security Using Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

宋成煥\* · 林正煜\*\* · 文承逸\*\*\*

(Sung-Hwan Song · Jung-Uk Lim · Seung-Il Moon)

**Abstract** - This paper presents an operation scheme to enhance the power system security by applying FACTS on power systems. Three main generic types of FACTS devices are suggested and illustrated. Flow congestions over lines have been solved by controlling active power of series-compensated FACTS devices and low voltages at buses have been solved by controlling reactive power of shunt-compensated FACTS devices. Especially, UPFC has been applied in both line congestion and low voltages. Two kinds of indices which indicate the power system security level related to line flow and bus voltage are utilized in this paper. They have been minimized to enhance the power system security level through the iterative method and the sensitivity vector of security index is derived to determine the direction to minimum. The proposed algorithm has been tested on the IEEE 57-bus system with FACTS devices in a normal condition and a line-faulted contingency.

**Key Words** : FACTS(Flexible AC Transmission Systems), Security Indices, Sensitivity Vector, Operation Scheme

### 1. 서론

전력수요의 증가와 구조개편의 영향으로 전력시스템의 계획(Planning) 및 운용(Operation)이 이전보다 더욱 복잡해지고 있다. 특히, 사고의 영향을 견디는 정도를 나타내는 안전도(Security)의 경우는 전력산업의 구조개편이 진행됨에 따라 더욱 관심이 고조되는 실정이다. 증가하는 전력 수요에 맞추어 전력시스템을 안정하게 운영하기 위해서는 기본적으로 신규 발전기 및 선로의 건설이 필요하다. 하지만, 설비 부지 문제를 비롯하여 건설 기간의 지연, 환경 문제 등으로 설비 건설이 계획된 것만큼 용이하지 못할 수 있다. 이러한 문제를 보다 효과적으로 해결하기 위하여 기존의 선로의 용량을 극대화하는 방법인 유연송전시스템, 즉, FACTS(Flexible AC Transmission Systems)가 대두되었다.

FACTS를 계통에 적용하면 선로 임피던스 및 전류, 모션 전압 및 위상각과 같은 변수(parameters)들을 능동적으로 제어함으로써, 선로 조류 및 모션 전압을 바꿀 수 있다. 이러한 장점을 이용하면 과도 안정도, 미소신호 안정도와 같은 안정도(Stability) 문제뿐만 아니라, 본 논문의 관심 대상인 상정 사고 상황에서의 안전도(Security) 문제도 해결할 수 있다.

FACTS에 대한 기존의 연구는 크게 과도 상태에서의 제어와 정상상태에서의 운용 및 계획에 관한 연구로 나눌 수 있

는데, 주로, FACTS 기기들에 대한 정적 및 동적 수리 모형을 구하고 이를 바탕으로 정상상태의 해석 및 제어에 초점이 맞추어져 연구가 수행되었다[1]-[4]. 중부하나 사고를 상정하여 이러한 상황에서의 시스템 안전도 문제를 해결하기 위한 방안으로서의 FACTS를 적용한 연구가 수행되었는데, 이 연구에서는 대표적인 유연송전기기인 UPFC(Unified Power Flow Controllers)만을 고려하였다[5]. 본 논문에서는 UPFC뿐만 아니라 TCSC와 같은 직렬보상기기 및 STATCOM과 같은 병렬보상기기를 계통에 적용하여 시스템의 안전도 수준을 향상시키는 방안을 제안한다. 즉, 여러 종류의 FACTS 기기를 계통에 적용하여 선로의 과부하를 해소하고, 전압을 일정 수준으로 유지하기 위한 방안을 제안한다.

본 논문에서는 직렬보상기기는 조류 제어를 위해서 적용되고, 병렬보상기기는 전압 제어를 위해서 적용되며, 직렬보상기기는 조류 및 전압 제어가 모두 필요한 경우에 적용된다고 가정한다. 또한, 본 논문에서는 시스템의 안전도를 평가하기 위해 조류 및 전압에 관하여 기존에 제안된 안전도 지수(Security Index)를 사용하였고[8],[9], 이러한 안전도 지수는 민감도 벡터(Sensitivity Vector)를 유도하여 반복적인 방법(Iterative Method)을 통하여 최소화되었다[5]. 안전도 지수의 감소는 안전도 여유(Security Margin)를 증가시키는 역할을 하게 되는데, 본 논문에서 제안된 FACTS 기기에 대한 운영 알고리즘은 부하 수준과 사고 상황을 고려한 IEEE 57 모션 시스템에 적용되어 그 타당성이 입증되었다.

### 2. FACTS 기기의 종류

FACTS 기기는 크게 직렬보상기기, 병렬보상기기, 직·병렬

\* 準會員: 서울大學 電氣·컴퓨터 工學部 博士課程

\*\* 正會員: 明知大學 次世代電力技術研究센터 研究教授 · 工博

\*\*\* 正會員: 서울大學 電氣·컴퓨터 工學部 副教授 · 工博

接受日: 2002年 10月 9日

最終完了: 2003年 2月 15日

보상기기의 3가지 형태로 나누어진다. 그림 1은 FACTS기기의 기본적인 모형을 구조적으로 보여준다[6]. 원칙적으로 직렬보상기기는 선로에 전압을 인가하며, 병렬보상기기는 시스템 연결부에 전류를 인가한다. 그리고 직·병렬보상기기는 직렬부에 전압을 병렬부에 전류를 인가한 형태를 보여준다.

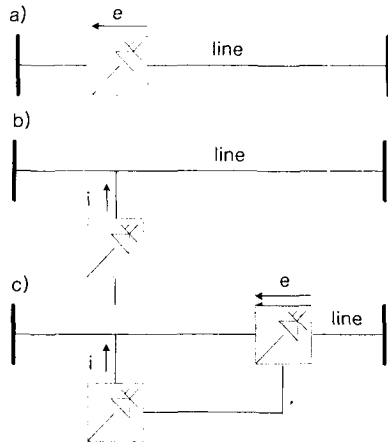


그림 1 FACTS기기의 기본적인 구조 a) 직렬보상기기, b) 병렬보상기기, c) 직·병렬보상기기

Fig. 1 Basic Types of FACTS Devices;

- a) Series Controllers, b) Shunt Controllers,
- c) Combined Series-Shunt Controllers

표 1은 그림 1에서 설명한 FACTS의 종류별 기기들을 제어되는 변수들과 함께 정리한 것이다[7]. 직렬보상기기는 궁극적으로 선로 조류를 제어하는데 사용되고, 병렬보상기기는 모선 전압을 제어하는데 사용된다. 또한, UPFC와 같은 직·병렬보상기기는 유효 및 무효전력을 함께 제어하는데 사용된다.

표 1 FACTS 기기의 종류

Table 1 Types of FACTS Devices

Type	궁극적으로 제어되는 변수	FACTS 종류
직렬보상기기	Series $\bar{P}$	TCSC, SSSC, TPCAR
병렬보상기기	Shunt $\bar{Q}$	SVC, STATCOM
직·병렬보상기기	Series $P$ & Shunt $\bar{Q}$	UPFC

표 1에 나타난 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensator), SSSC (Static Synchronous Series Compensator) 및 TPCAR (Thyristor Controlled Phase-Angle Regulator)과 같은 직렬보상기기들은 선로 과부하 문제를 완화시키고 선로 용량을 증대시킬 수 있다. SVC(Static Var Compensator)와 STATCOM (Static Synchronous Compensator)과 같은 병렬보상기기들은 모선에 투입되는 무효전력을 조절함으로써 전압을 일정 수준으로 유지시킬 수 있다. UPFC (Unified Power Flow Controller)와 같은 직·병렬보상기기는 직렬보상기기 및 병렬보상기기의 특징을 모두

가지고 있기 때문에 조류 혼잡 완화 및 전압 보상에 적용될 수 있다.

그림 1과 표 1에서 설명한 FACTS 기기를 계통에 적용할 때에 반드시 고려되어야 할 사항이 세 가지 있는데, 이를 나열하면 다음과 같다.

- 어떤 종류의 FACTS 기기를 설치해야 하는가?
- 대상 전력시스템의 어느 위치에 설치해야 하는가?
- 설치 용량은 얼마나 되어야 하는가?

본 논문에서는 세 가지 고려 사항 중에서 처음 두 가지 사항에 대해 초점을 맞추었다. 즉, 안전도 측면에서 시스템에 설치될 FACTS 기기의 종류와 위치를 정하기 위한 원칙은 FACTS 제어 목적과 밀접한 관련이 있다. 예를 들면, 직렬보상기기는 조류 제어가 필요한 선로에, 병렬보상기기는 전압 제어가 필요한 모선에 설치되어야 한다.

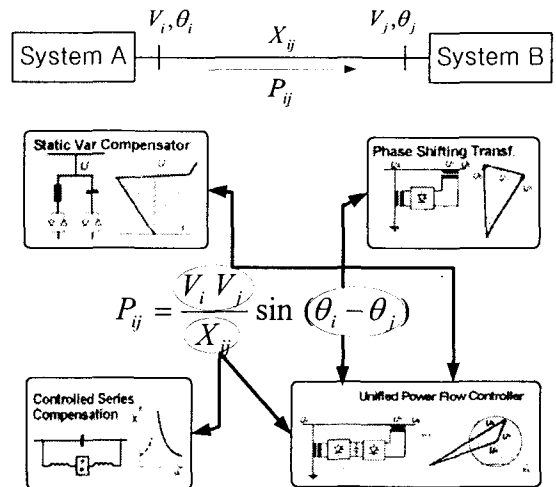


그림 2 유효전력과 FACTS 기기의 제어가능 변수

Fig. 2 The Active Power and The Controllable Variables by Each FACTS

그림 2에서는 선로에 흐르는 유효전력과 FACTS 기기 종류별로 유효전력에 대한 제어 가능 변수를 나타내었다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 직렬보상기기는 선로 리액턴스  $X_{ij}$ 를, 병렬보상기기는 송전단과 수신단의 모선전압크기를 각각 제어한다. 또한, 위상각 제어기는 전압의 위상차를 제어한다. 직·병렬보상기기인 UPFC의 경우에는 선로 리액턴스, 전압, 위상각 등의 모든 변수를 제어할 수 있다. 그림 2에 나타난 FACTS 기기들은 빠른 제어 특성과 연속적인 보상 능력을 가지고 있다.

UPFC가 비록 선로 조류와 모선 전압을 모두 제어할 수 있지만, 비용 문제로 인하여 설치에 제약을 받게 된다. 왜냐하면, 보상의 목적에 따라서 FACTS기기의 종류가 결정되기 때문이다. 예를 들어, 전압 보상만이 필요한 곳에서는 STATCOM을 설치하는 것이 UPFC를 설치하는 것보다 더 경제적이고, 마찬가지로 조류 제어만이 목적이라면 TCSC를 설치하는 것이 UPFC를 설치하는 것보다 비용 절감의 효과를 볼 수 있기 때문이다.

### 3. 안전도 지수 및 안전도 지수의 최소화

#### 3.1 안전도 지수의 최소화

계통의 안전도를 나타내는 지수  $J$  는 다음과 같이 표현된다. 이것은 각 사고 결과의 심각성을 나타내는데 사용되는 것으로 이미 여러 문헌에서 제시된 바 있다. [8],[9].

$$J_P = \sum_k a_k \left( \frac{P_k}{P_k^{\max}} \right)^2 \quad (1)$$

$$J_V = \sum_m b_m (V_m - V_m^{\text{ref}})^2 \quad (2)$$

$$J = J_P + J_V \quad (3)$$

$k$  : 송전선로 수

$m$  : PQ모선의 수

$a_k, b_m$  : 가중치

$P_k$  : k번째 선로의 유효전력

$P_k^{\max}$  : k번째 선로의 최대 유효전력

$V_m$  : m번째 모선의 전압 크기

$V_m^{\text{ref}}$  : m번째 모선의 기준 전압 크기

안전도 지수  $J$ 는 선로 조류와 관계된  $J_P$ 와 모선 전압과 관련된  $J_V$ 로 구성된다.  $J_P$ 는 선로의 총 유효전력 흐름의 균등한 정도를 나타내는 지수이며,  $J_V$ 는 모선의 전압이 기준 전압에 가까운 정도를 나타내는 지수이다. 그리고, 이러한 지수들은 선로가 과부하에 걸리거나, 저전압 모선의 수가 증가할수록 증가한다. 즉, 지수가 감소한다는 것은 전력 시스템의 안전도가 향상된다는 것을 의미한다. 따라서, 안전도 지수  $J$ 는 전력 시스템의 안전도를 평가하는데 이용될 수 있다.

#### 3.2 조류에 대한 안전도 지수 $J_P$ 의 최소화

식 (1)에서  $J_P$ 의 가중치를 1로 두면  $J_P$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다[9].

$$J_P = \sum_i \sum_{j \neq i} \left( \frac{P_{ij}}{P_{ij}^{\max}} \right)^2 \quad (4)$$

여기서,

$i, j$  : 모선 지수

$P_{ij}$  : 모선  $i$ 와  $j$  사이의 선로 유효전력

$P_{ij}^{\max}$  : 모선  $i$ 와  $j$  사이의 선로 총 용량

그리고 각 모선의 유효전력에 대한 지수,  $J_P$ 의 민감도는 다음과 같이 표현된다. 식 (5)를 계산할 때는 그림 2의  $P_{ij}$

표현식이 이용되었다.

$$\frac{\partial J_P}{\partial P_k^F} = 2 \sum_i \sum_{j \neq i} \left( \frac{V_i V_j}{X_{ij} P_{ij}^{\max}} \right)^2 \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \left( \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial P_k^F} \right) \quad (5)$$

만약 FACTS 기기의 개수가  $n$ 개라면,  $n$ 개의 FACTS 기기에 대한 민감도를 구하면 다음과 같이 그라디언트 (gradient)로 표현할 수 있다.

$$\vec{\nabla} J_P = \left[ \frac{\partial J_P}{\partial P_1^F} \quad \frac{\partial J_P}{\partial P_2^F} \quad \dots \quad \frac{\partial J_P}{\partial P_n^F} \right]^T \quad (6)$$

그리고, Marquart 방법[10]을 적용하기 위해 Hessian 행렬을 식 (6)에 표현된 그라디언트 벡터로부터 구할 수 있다.

$$H_P = \vec{\nabla} J_P^T \cdot \vec{\nabla} J_P \quad (7)$$

여기서 Hessian 행렬이 역행렬로 변환될 때, singular 해질 수 있기 때문에 다음과 같은 수정 과정이 필요하다.

$$H_{Pmod} = H_P + \alpha \cdot I \quad (8)$$

여기서,

$\alpha$  : 정수

$I$  :  $H_P$ 와 같은 차원의 단위행렬

이 Hessian을 이용하여 아래와 같이 유효전력에 관한 탐색 벡터  $\vec{S}_P$ 를 구할 수 있다.

$$\vec{S}_P = -H_{Pmod}^{-1} \cdot \vec{\nabla} J_P \quad (9)$$

다기의 FACTS 기기에 대하여 각 기기의 유효전력 제어량의 갱신된 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} [P_1^F \ P_2^F \ \dots \ P_n^F]_{new}^T = \\ [P_1^F \ P_2^F \ \dots \ P_n^F]_{old}^T + \vec{S}_P \end{aligned} \quad (10)$$

이 탐색 벡터는 안전도 지수가 감소되는 방향, 즉 시스템 안전도가 향상되도록, FACTS 기기의 적절한 운영점을 찾는 데 이용된다.

#### 3.3 전압에 대한 안전도 지수 $J_V$ 의 최소화

$J_P$ 의 최소화 과정과 마찬가지로, 식 (2)에서  $J_V$ 의 가중치

를 1로 두면  $J_v$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J_v = \sum_i (V_i - V_i^{ref})^2 \quad (11)$$

여기서,

- $i$ : 모선 지수
- $V_i$ : 모선  $i$ 의 전압
- $V_i^{ref}$ : 모선  $i$ 의 기준전압

그리고 각 모선의 무효전력에 대한 지수  $J_p$ 의 민감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J_p}{\partial Q_m^F} = 2 \sum_i \frac{\partial V_i}{\partial Q_m^F} (V_i - V_i^{ref}) \quad (12)$$

만약 FACTS의 개수가  $n$ 개라면,  $n$ 개의 FACTS에 대한 민감도를 구하면 식 (13)과 같이 그래디언트(gradient)로 표현할 수 있다. 앞에서의  $J_p$  최소화 과정과 유사하게 수정된 Hessian matrix를 통하여 탐색벡터를 구한 다음, 전압 안전도 향상을 위한 FACTS 기기의 무효전력 제어량을 찾는 방향 벡터가 다음과 같이 유도된다.

$$\vec{\nabla} J_v = \left[ \frac{\partial J_v}{\partial Q_1^F} \quad \frac{\partial J_v}{\partial Q_2^F} \quad \dots \quad \frac{\partial J_v}{\partial Q_n^F} \right]^T \quad (13)$$

$$H_v = \vec{\nabla} J_v^T \cdot \vec{\nabla} J_v \quad (14)$$

$$H_{vmod} = H_v + \alpha \cdot I \quad (15)$$

$$\vec{S}_v = -H_{vmod}^{-1} \cdot \vec{\nabla} J_v \quad (16)$$

$$\left[ Q_1^F \quad Q_2^F \quad \dots \quad Q_n^F \right]^T_{new} = \left[ Q_1^F \quad Q_2^F \quad \dots \quad Q_n^F \right]^T_{old} + \vec{S}_v \quad (17)$$

#### 4. 시스템 안전도 향상을 위한 FACTS 기기의 운영 알고리즘

그림 3에서는 반복법에 의한 안전도 지수 최소화 알고리즘을 나타내었다. 안전도 지수를 최소화하여 안전도 여유를 극대화하기 위한 FACTS 기기의 운영 알고리즘은 다음과 같다. 모선 전압의 경우에는 병렬로 투입되는 무효전력을 제어하여 보상하기 때문에 고려 대상 변수의 수가 작지만, 선로 조류의 경우에는 고려해야 되는 변수의 수가 상대적으로 많고 변수들이 서로 얽혀 있기 때문에, 전압에 대한 안전도 지수  $J_v$ 를 먼저 최소화하고 조류에 대한 안전도 지수  $J_p$ 를 최소화해야 한다. 이러한 순서에 따라 FACTS 기기별로 각각의 운영점을 결정한다.

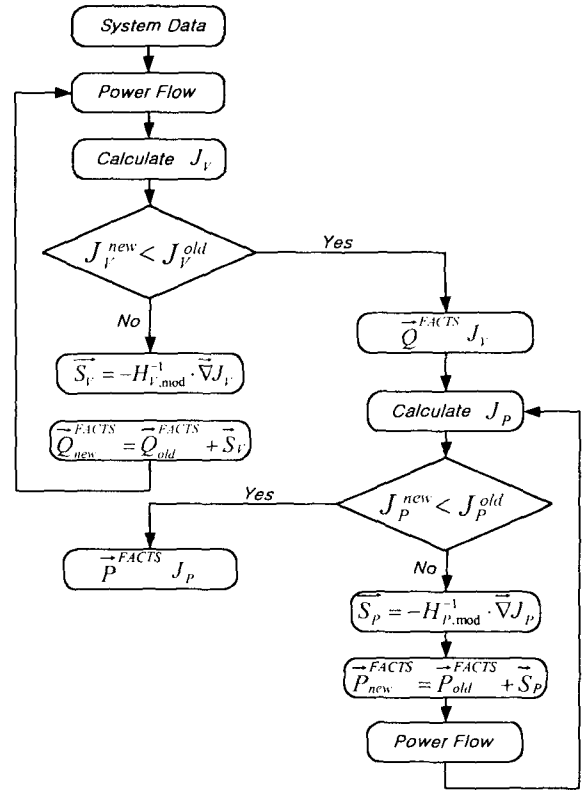


그림 3 안전도 향상을 위한 FACTS 기기 운영 알고리즘  
Fig. 3 FACTS Operation Algorithm to Enhancement the System Security Level

#### 5. 사례 연구

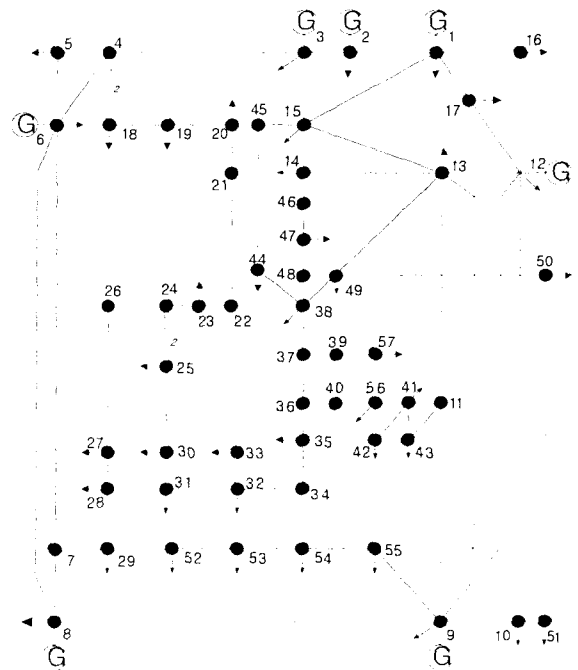


그림 4 IEEE57 모선 시스템  
Fig. 4 IEEE57 Bus System

본 논문에서 제안된 알고리즘을 그림 4에 나타난 IEEE 57 모션 시스템에 적용하였다. 부하수준을 평균부하(100%) 및 중부하(110%)로 나누었고, 정상 상태와 선로 고장 상황을 모의하였다. 선로 고장의 경우에는 한 선로의 사고(N-1) 상황만을 고려하였다[8].

또한 본 사례 연구에서 고려된 안전도측면에서의 FACTS 기기별 설치 원칙은 다음과 같다.

먼저, 병렬보상기기는 저전압 현상이 발생하는 지역에 설치하되, p.u.단위로 전압 크기가 가장 크게 떨어진 모션이나 부하가 직접 연결되어 있는 모션에 우선적으로 보상하였고, 직렬보상기기는 주변 조류분포를 확인한 다음 가장 선로 용량의 여유가 많은 주변선로에 직렬보상기기를 설치하여 혼잡 조류를 전가(Transfer)하는 간접제어를 하였으며, 이런 간접 제어 효과가 작을 경우 직접 과부하 선로에 직렬보상기기를 설치하여 혼잡조류 문제를 완화시켰다.

5.1 평균부하 및 중부하에서의 FACTS 운영

표 2에서는 평균부하와 중부하의 상황에서, 선로 조류가 용량을 초과되는 과부하 선로 및 전압이 0.95[pu]이하인 저전압 모션을 나타내었다. 표 2로부터 평균부하와 중부하에서 공통적으로 나타나는 저전압 모션은 31, 32, 33번 모션이고, 사고가 없는 평시에는 선로의 혼잡 문제보다는 저전압 문제가 심각함을 알 수 있다.

표 2 평균부하 및 중부하의 과부하 선로 및 저전압 모션  
Table 2 The Overloaded Lines and Low Voltage Buses in an Average Load and a Heavy Load

부하	과부하 선로	저전압 모션
평균부하(100%)	-	31, 32, 33
중부하(110%)	1-2, 2-3	26, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 57

5.1.1 평균부하에서의 FACTS 운영

평균부하의 정상상태에서는 3개의 모션에서 저전압 문제만이 발생하였다. 전압 보상을 위해서 가장 심각한 저전압 문제가 발생된 31번 모션에 병렬보상기기를 설치하는 것이 바람직하다. 표 3에서는 평균부하에서 병렬보상기기의 보상 전과 후의 안전도 지수 변화를 보여주고 있다.  $J_p$ 의 경우는 보상 전과 후의 변화가 거의 없지만,  $J_v$ 의 경우는 병렬보상기에 의한 효과로 44.646에서 35.302로 크게 감소되어 전압에 대한 시스템의 안전도가 향상됨을 알 수 있다.

표 3 평균부하에서의 안전도 지수 변화  
Table 3 The Security Index in an Average Load

	보상 전	보상 후
$J_p$	16.526	16.515
$J_v (\times 1000)$	44.646	35.302

그림 5는 병렬보상기기의 보상 이전과 이후의 31번 모션 및 그 주변 모션의 전압 분포를 보여주고 있다. 그림 5에서 알 수 있듯이 저전압 모션이었던 31, 32, 33번 모션에서 모두 0.95[pu] 이상으로 전압이 상승되었다.

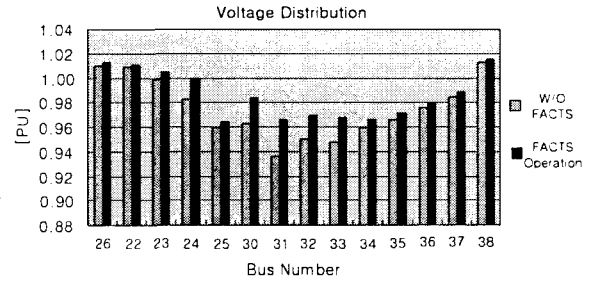


그림 5 평균부하에서의 전압 분포  
Fig. 5 The Voltage Distribution in an Average Load

5.1.2 중부하에서의 FACTS 운영

중부하의 경우, 표 2에서 알 수 있듯이 평균부하의 경우보다 과부하 선로의 수와 저전압 모션의 수가 많다. 먼저, 가장 전압이 낮은 31번 모션에 병렬보상기기를 설치하여 저전압 모션들의 전압을 보상하였고, 직렬보상기기를 선로 1-16에 설치하여 1-2, 2-3의 과부하 문제를 완화하는 것이 바람직하다.

표 4는 중부하에서 FACTS의 보상 전과 후의 안전도 지수 변화를 보여주고 있다.  $J_p$ 와  $J_v$ 의 값이 FACTS의 운용으로 감소되어 조류나 전압 부분에 대한 시스템의 안전도가 함께 향상되었음을 보여주고 있다.

표 4 중부하에서의 안전도 지수 변화  
Table 4 The Security Index in a Heavy Load

	보상 전	보상 후
$J_p$	23.320	22.792
$J_v (\times 1000)$	68.898	39.963

표 5는 FACTS를 통한 보상 전과 보상 후의 조류 분포를 보여주고 있다. 1-16 선로에 설치된 직렬보상기기를 통해 조류가 전가(transfer)됨으로써 과부하를 겪고 있는 선로 1-2, 2-3의 조류가 선로 용량 이내로 줄어들었으며, 주변 선로 또한 선로 조류가 용량 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다.

표 5 중부하에서의 조류 분포  
Table 5 The Flow Distribution in Heavy Load

선로		보상 전		보상 후	
From	To	P	P/P <sub>ma</sub>	P	P/P <sub>ma</sub>
1	2	136.78	1.052	129.87	0.999
2	3	131.64	1.013	124.85	0.960
3	4	84.50	0.939	81.18	0.902
4	5	22.26	0.696	21.03	0.652
4	6	26.22	0.403	24.39	0.375
1	15	195.97	0.980	185.25	0.926
1	16	104.24	0.802	129.87	0.999
1	17	119.78	0.921	111.49	0.858

그림 6은 31번 모선 및 주변 모선이 병렬보상기기를 통하여 전압 상승효과가 나타나고 있음을 보여주고 있다. 저전압 문제가 발생한 모든 모선의 전압 값이 0.95[pu] 이상의 값을 가지면서 전압 안전도가 향상되었다.

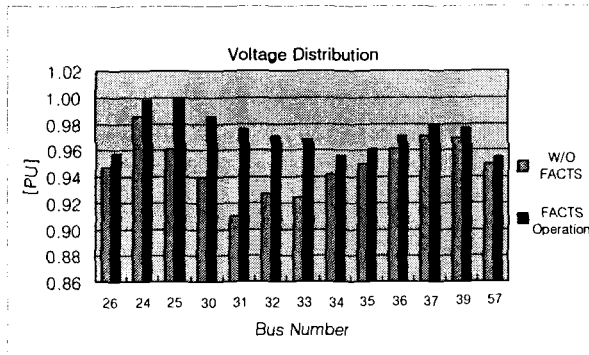


그림 6 중부하에서의 전압 분포  
Fig. 6 The Voltage Distribution in Heavy Load

5.2 선로사고 발생시 평균부하 및 중부하의 FACTS 운영

표 6은 가장 심각한 상정사고인 7-29 선로에 사고가 발생하여 트립(trip)되었을 때, 평균부하 및 중부하에서의 과부하 선로 및 저전압 모선을 나타낸 것이다. 평시 상황인 표 2와 표 6을 비교하면, 사고 발생시에 과부하 선로와 저전압 모선이 더욱 많이 발생하여 시스템의 안전도 문제가 보다 심각해짐을 알 수 있다.

표 6 선로사고 발생시 평균부하 및 중부하의 과부하 선로 및 저전압 모선

Table 6 The Overloaded Lines and Low Voltages in an Average Load and a Heavy Load with a Line Fault

부하	과부하 선로	저전압 모선
평균부하 (100%)	8-9, 53-54, 54-55, 38-48, 9-55	19, 20, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 52, 53, 54, 56, 57
중부하 (110%)	1-2, 2-3, 8-9, 1-15, 14-15, 14-46, 46-47, 47-48, 53-54, 54-55, 11-43, 38-48, 9-55	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 52, 53, 54, 56, 57

5.2.1 선로사고 발생시 평균부하에서의 FACTS 운영

평균부하에서 7-29 선로에 사고가 발생하였을 때, 5개의 선로에서 과부하 문제가 발생하였으며, 24개의 모선에서 저전압 문제가 발생하였다. 전압 보상을 위해서 저전압 모선 순으로 29, 52, 31, 20모선에 총 4개의 병렬보상기기를 설치하였다. 조류 혼잡 완화를 위해서는 3개의 직렬보상기기가 8-6, 9-55, 38-48 선로에 각각 설치되었다. 또한, 9-55의 직렬보상기기에 의한 조류 증가에 대처하고, 주변의 저전압을 보상하기 위하여 26-24 선로에 UPFC가 설치되었다.

표 7은 평균부하에서 7-29선로 사고 발생시, FACTS기기 보상 전후의 안전도 지수의 변화를 나타낸 것이다. 표 7에서

알 수 있듯이  $J_p$ 가 27.051에서 24.950으로,  $J_v$ 가 18.232에서 9.164로 각각 감소되었다.

표 7 선로사고 발생시 평균부하에서의 안전도 지수 변화  
Table 7 The Security Index In an Average Load with a Line Fault

	보상 전	보상 후
$J_p$	27.051	24.950
$J_v (\times 10)$	18.232	9.164

그림 7에서는 평균부하시 7-29선로에 사고가 발생하였을 때, FACTS 기기의 보상 효과를 조류 및 전압의 관점에서 보여주고 있다. FACTS 운영을 통해 과부하 선로의 조류의 값이 선로 용량  $P_{max}$  이내의 값을 가지고, 모든 저전압 모선의 값이 1[pu] 근처의 값을 가지므로써, 시스템의 안전도가 향상되었다.

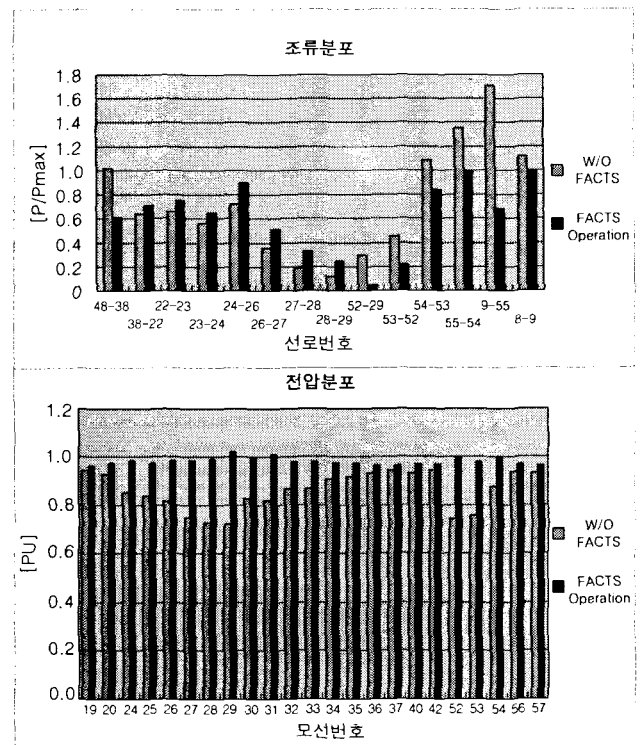


그림 7 선로사고 발생시 평균부하에서의 조류 분포 및 전압 분포 a) 조류 분포 b) 전압 분포

Fig. 7 The Distribution of Line Flows and Bus Voltages in Average Load with a Line Fault: a) Line Flow Distribution, b) Bus Voltage Distribution

5.2.2 선로사고 발생시 중부하에서의 FACTS 운영

중부하 상황에서 7-29 선로에 사고가 발생하면, 총 13개 선로에서 과부하 문제가 발생하고, 27개의 모선에서 저전압 문제가 발생한다. 이를 대처하기 위하여 평균부하시 사고 발생의 경우보다 27, 57번 모선에 병렬보상기기를 추가적으로 설치하였고, 직렬보상기기도 1-16 선로와 11-43 선로에 추가

적으로 설치하였다. 또한, 조류 제어와 전압 보상을 동시에 수행하기 위해 26-24 선로에 UPFC를 추가적으로 설치하였다.

표 8에서는 중부하에서 7-29선로 사고 발생시, FACTS기기 보상 전과 후의 안전도 지수의 변화를 나타내었다.  $J_p$ 의 값은 36.733에서 31.485로,  $J_v$ 의 값은 25.971에서 11.272로 각각 감소되었다. 그림 8은 중부하, 사고 상황에서 FACTS기기 설치 및 운영을 통한 조류 분포 및 전압 분포의 변화를 보여주고 있다. 표 8 및 그림 8을 보면 중부하 상황에서 7-29선로 사고가 발생하였을 때에도 FACTS 운영을 통해 시스템의 안전도가 향상됨을 알 수 있다.

표 8 선로사고 발생시 중부하에서의 안전도 지수 변화  
Table 8 The Security Index In a Heavy Load with a Line Fault

	보상 전	보상 후
$J_p$	36.733	31.485
$J_p(\times 10)$	25.971	11.272

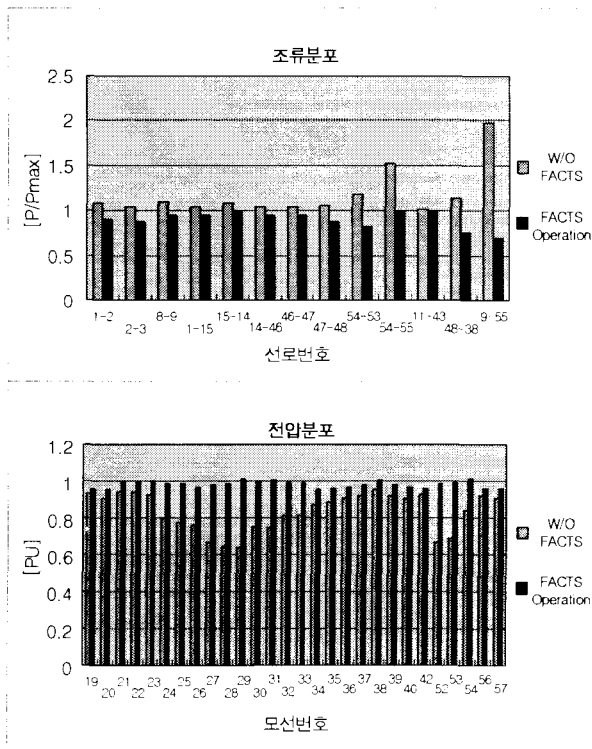


그림 8 선로사고 발생시 평균부하에서의 조류 분포 및 전압 분포 a) 조류 분포 b) 전압 분포

Fig. 8 The Distribution of Line Flows and Bus Voltages in Heavy Load with a Line Fault; a) Line Flow Distribution, b) Bus Voltage Distribution

### 6. 결 론

본 논문에서는 전력시스템의 안전도 향상을 위하여 FACTS기기별로 각각의 설치 목적에 따라 설치 위치를 결정

하였고, 각 기기의 운용점을 구하는 방안을 제안하였다. 사례 연구를 통하여 본 논문에서 제안한 방안의 타당성을 수치적으로 입증하였는데, 이를 정리하면 다음과 같다.

- 조류 과부하만이 문제가 되는 곳에는 직렬보상기기를, 모션 전압만이 문제가 되는 곳에는 병렬보상기기를, 조류 및 전압 제어가 모두 필요한 곳에는 UPFC를 설치하여 설치 비용을 최소화하는 원칙을 제시하였다.
- 평균부하 및 중부하 상태에서 정상상태 및 가장 심각한 단일상정사고(N-1)에 대하여 FACTS 기기를 적용할 경우, 안전도 지수  $J_p$  및 전압에 관한 안전도 지수  $J_v$ 는 본 논문에서 제안한 민감도 벡터를 이용한 반복적인 계산으로 최소화되었다.
- 제안된 알고리즘을 적용하여  $J_p$  및  $J_v$ 를 최소화한 후의 조류 및 선로의 분포를 살펴보면, 모든 선로 조류 및 모션 전압이 각각의 선로 용량 및 기준 전압 1[pu] 근처의 값을 가져 안전도가 향상되었음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 FACTS 기기의 적용을 통한 안전도 향상 방안은 FACTS 기기의 활용 영역을 넓히는 데 중요한 역할을 담당하게 될 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.Noroozian, L.Angquist, M.Ghandhari, G.Anderson, "Improving Power System Dynamics by Series-connected FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, No.4, October 1997.
- [2] 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, October 1997.
- [3] Roy Billinton, Mahmud Fotuhi-Firuzabad, Sherif Omar Faried, Saleh Aboreshaid, "Impact of Unified Power Flow Controllers on Power System Reliability", IEEE Trans. on Power Systems Vol.15, No.1, February 2000.
- [4] James A. Momoh, Jizhong Z. Zhu, Garfiled D. Boswell, Stephen Hoffman, "Power System Security Enhancement by OPF with Phase Shifter", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.16, No.2, May 2001.
- [5] J.U. Lim, S.I. Moon, "An Operation Scheme of UPFC's Considering Operation Objectives and States," IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING 2002, Chicago, IL USA, July 21-25, 2002. pp.0-7803-7519 x/02
- [6] Narain G. Higorani, Laszlo Gyugyi, Understanding

- FACTS : Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, pp1-29, 2000.
- [7] Douglas J. Gotham, G.T.Heydt, " Power Flow Control and Power Flow Studies for Systems with FACTS Devices", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.13, No.1, February 1998.
- [8] Atif S. Debs, Modern Power Systems Control and Operation, KluwerAcademic Publishers, pp119-122, 1988.
- [9] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, John Wiley & Sons, Inc., pp430-432, 1996
- [10] S.S Rao, Engineering Optimization, John Wiley & Sons, pp 392-394, 1996

저 자 소 개



**송 성 환 (宋 成 煥)**

1978년 5월 30일 생. 2001년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 서울대 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업 (석사). 2003년 현재 동 대학원 전기·컴퓨터 공학부 박사 과정

Tel : 02-880-7257

E-mail : karyman@powerlab.snu.ac.kr



**임 정 욱 (林 正 煜)**

1970년 9월 27일 생. 1996년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 서울대 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업 (석사). 2002년 동 대학원 전기·컴퓨터공학부 졸업 (박사). 2003년 현재 명지대학교 차세대전력 기술연구센터 연구교수

Tel : 018-233-7258

E-mail : limbert@orgio.net



**문 승 일 (文 承 逸)**

1961년 2월 1일 생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 오하이오 주립대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업 (박사). 1993~1997년 전북대 전기공학과 조교수. 1997~현재 서울대 전기·컴퓨터 공학부 부교수

Tel : 02-880-1821

E-mail : moonsi@plaza.snu.ac.kr