FACTS를 이용한 지역간 융통전력 증대방안에 관한 연구

論 文
53A-8-4

A Study on Enhancement Available Transfer Capability Using Flexible AC Transmission System (FACTS)

金 良 一** · 鄭 盛 元* · 奇 坰 炫** · 金 在 顯***
(Yang-il Kim · Sungwon Jeung · Kyunghyun Ki · Jaehyeon Gim)

Abstract - This paper focuses on the evaluation of FACTS control on available transfer capability(ATC) enhancement. Technical merit of FACTS technology on ATC boosting are analyzed. More effective control means for line flow and bus voltage are required for appling FACTS. In this paper, the power flow calculation method for deriving FACTS control parameters based on current injection model(CIM) and newton method. Integrated scheme for ATC calculation considering dynamic characteristic of power system is suggested. Study is based on the IEEE 57-bus system demonstrate the effectiveness of FACTS control on ATC enhancement.

Key Words : FACTS, ATC, Power Flow, Stability

1. 서 론

전력 산업 구조 개편에 따라 전력시장에도 시장 경제논리를 반영한 급전 방식이 도입되고 있다. 과거의 중앙 집중적인 급전체제에서는 계통의 안정성과 경제성을 동시에 고려하여 운영되어 왔지만, 구조 개편에 따라 개별 사업자의 이익이 우선되는 환경으로 전환되었다. 따라서 송전선을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위하여, 기존에 사용하고 있는 송전 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 용량의 중요성이 확대되고 있다. 이에 대한 척도로 송전 계통에 주어진 시간동안 사용하지 않고 남아 있는 용량을 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)이라고 한다. ATC를 계산하는 여러 방법이 제안 되었으나[1,2] 이에 존재하는 불확실성으로 인해 그 값을 결정하기가 매우 복잡하고 어려운 문제이다.

한편 전력계통의 부하가 급속히 증가하고 송전선로 건설의 어려움으로 기존에 있는 송전계통이 한계에 도달하게 됨으로 전력 조류의 효과적인 제어가 절실히 요구된다. 이러한 송전 계통을 보완하기 위한 효율적인 방법으로 FACTS (Flexible AC Transmission System)를 설치하여 전송 용량을 증대하는 것이다. FACTS는 모선전압뿐만 아니라 선로의 조류도 제어할 수 있어 전력계통을 제어하는데 유연성, 효율성, 및 다양성을 가지고 있다. 이와 같은 장점으로 전력회사는 FACTS의 적용을 확대하고 있다.[3, 4]

* 學生會員 : 順天大 工大 情報通信工學部 碩士課程
** 正 會 員 : 順天大 工大 情報通信工學部 博士課程
*** 正 會 員 : 順天大 工大 情報通信工學部 副敎授 · 工博
接受日字 : 2004年 6月 7日
最終完了 : 2004年 7月 5日

FACTS를 이용하여 전력시스템을 운용하기 위해서는 정상상태 해석이 필요하며 이를 위해서는 우선적으로 조류계산을 수행하여야 한다. 참고문헌[5]의 조류계산에서는 원하는 값과 계산된 값 사이의 오차에 의하여 제어 변수를 제어하는 방법으로 간단하며 프로그램의 다른 부분은 수정하지 않지만 수렴속도가 늦은 단점이 있다. 또한 수렴성을 증진하기 위한 방법으로 감도법[6]과 분배계수[7]을 이용하였고 제어 변수를 독립 변수로 하여 자동 제어된 방법[8]들이 있다. 이 방법은 수렴특성은 좋지만 자코비안 행렬을 수정해야 하는 단점이 있다.

FACTS를 전력 계통에 추가하였을 때 일반적인 조류계산 알고리즘으로는 발산하는 경우[8,9]가 많아 전력계통의 FACTS에 대한 영향을 분석하기가 어렵다. FACTS를 효과적으로 제어하기 위해서는 각각의 제어계수와 모델을 가지고 있어야 한다.

한편 과도 안정도를 분석하기 위하여 사용되는 UPFC의 동특성 모델은 등가 두 전압원으로 모델링하여 전력소자로 그 전압원을 제어하는 것으로 하였다.[10, 13] 직렬 주입 전압 V_{se}은 선로의 유효전력과 무효전력을 제어할 수 있고, 병렬 주입 전압 V_{sh}는 모선 전압을 제어 한다. 참고문헌[11]에서 페루프 궤환 제어를 이용하여 선로의 유효전력과 무효전력을 제어하는 기법을 제안하였고, 참고문헌[12]에서는 유효전력과 무효전력을 두 성분으로 분리하여 제어하는 방법을 제안하였다.

정적 융통전력 계산에 주로 사용하는 방법은 연속 조류계산법[2,14], 반복 조류계산법 및 안전도를 고려한 최적 조류계산법[15]등이 사용되고 있다. 반면에 동적 융통전력계산은 여러 가지 고려할 제약 조건이 많아 초기단계 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 FACTS의 다양한 모델에 대하여 전압원을 전류 주입 모델(CIM : Current Injection Model)과 Newton법

을 이용하여 조류계산에서 FACTS를 제어하는 방법을 제안하였다. 또한 정적 융통전력을 고려한 융통전력을 계산하고 그 결과가 동적 융통전력에서 활용할 수 있는 방법을 제시하였다. 이를 이용하여 IEEE 57모선 계통에 적용하여 FACTS의 융통전력 증진의 효과를 분석하였다.

2. UPFC 모델

2.1 UPFC의 전류 주입 모델

UPFC는 직렬 컨버터와 병렬 컨버터로 구성되고 그림1과 같이 계통에 변압기로 연결되어 있다. 병렬 변압기는 모선에 병렬로 연결되어 모선에 무효전력을 공급 또는 흡수하여 전압을 제어하고, 직렬 변압기는 선로사이에 연결되어 선로의 조류를 제어하는 역할을 한다. 여기서 z_{se}는 직렬 변압기의 임피던스이고 z_{sh}는 병렬 변압기의 임피던스이다.

SSSC는 이 등가회로의 병렬부분이 없는 것으로 I_{sh}가 영(0)인 경우와 같고 STATCOM은 직렬부분이 없어 V_{se}가 영(0)인 경우와 같다. TCPS는 V_{se}의 크기는 없고 위상만 있는 것이고 TCSC는 V_{se}는 영(0)이고 z_{se}를 변화하는 것으로 나타 낼 수 있다.

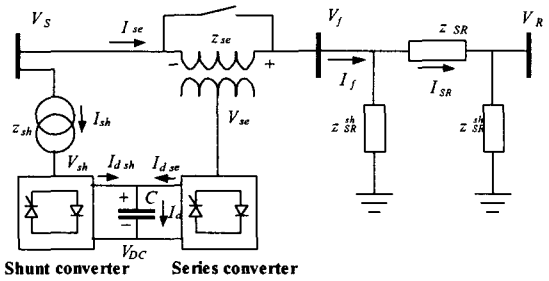

그림 1 UPFC의 구성도
Fig. 1 Structure of UPFC

그림 2는 UPFC의 등가회로이며 직렬 부분의 전원이 병렬부분에서 공급됨으로 식(1)을 만족해야 한다.

$$Re(-V_{sh}I_{sh}^{*}+V_{se}I_{se}^{*})=0 \tag{1}$$

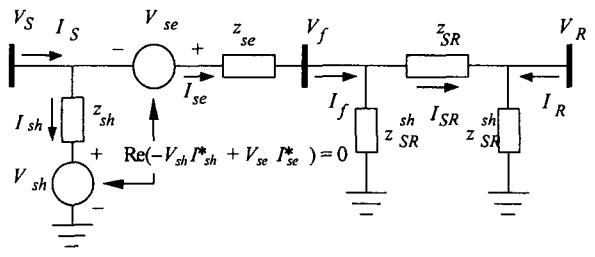

그림 2 UPFC의 등가회로
Fig. 2 Equivalent Circuit of UPFC

그림 3은 UPFC의 전압 전류의 벡터도이다. 수전단측 전압 V_R의 위상이 δ_R이고 송전단측 전압 V_S의 위상이 δ_S이라고 할 때 직렬 주입 전압 V_{se}는 두 개의 전압원 V_{sep}와 V_{seq}로 분리 할 수 있다. 병렬 전류 I_{sh}는 두 요소로 분리된다. 즉 모선 S전압에 직각이 되는 무효성분인 I_{shq}와 동상인 실수 성분인 I_{shp}로 분리된다.

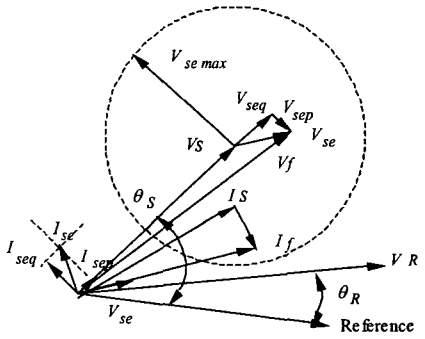

그림 3 UPFC의 벡터도
Fig. 3 Vector diagram of UPFC

I_{shp}는 캐패시터 전압을 조절하기 위하여 공급하는 전류로서 직렬 컨버터와 병렬 컨버터에 소비되는 유효전력의 균형을 유지한다. 그러므로 식(1)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Re(V_S I_{shp}^{*}+V_{se}I_{se}^{*})=0 \tag{2}$$

식(2)로부터 직렬 컨버터의 유효전류 성분은

$$I_{shp}=\frac{Re(V_{se}I_{se}^{*})}{|V_S|} \tag{3}$$

그림 2의 등가회로부터 전류 I_f는

$$\begin{aligned} I_{se} &= I_f \\ &= (y_{SR}+y_{SR}^{sh})(V_S+V_{se}-Z_{se}I_{se})-y_{SR}V_R \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 y_{SR}은 $1/z_{SR}$이고 y_{SR}^{sh}는 $1/z_{SR}^{sh}$이다. 식(4)로부터 I_{se}로 정리하면

$$I_{se}=\frac{(y_{SR}+y_{SR}^{sh})(V_S+V_{se})-y_{SR}V_R}{1+(y_{SR}+y_{SR}^{sh})z_{se}} \tag{5}$$

그러므로 모선 S의 전류 I_S는

$$\begin{aligned} I_S &= I_{sh}+I_f \\ &= I_{sh}+(y_{SR}+y_{SR}^{sh})(V_S+V_{se}-Z_{se}I_{se})-y_{SR}V_R \end{aligned} \tag{6}$$

식(6)에 식(5)를 대입하여 송전측의 주입 전류는

$$I_S = I_{sh}+Y_{SS}(V_S+V_{se})-Y_{SR}V_R \tag{7}$$

여기서 $$Y_{SS}=\frac{y_{SR}+y_{SR}^{sh}}{1+(y_{SR}+y_{SR}^{sh})z_{se}}$$

$$Y_{SR}=\frac{y_{SR}}{1+(y_{SR}+y_{SR}^{sh})z_{se}}$$

수전측의 주입 전류는

$$\begin{aligned} I_R &= y_{SR}(V_R-V_f)+y_{SR}^{sh}V_R \\ &= y_{SR}[V_R-(V_S+V_{se}-z_{se}I_{se})]+y_{SR}^{sh}V_R \end{aligned} \tag{8}$$

식(8)에 식(5)를 대입하면

$$\begin{aligned} I_R = &-Y_{SR}V_S-Y_{SR}V_{se} \\ &+[y_{SR}^{sh}+\frac{y_{SR}(1+y_{SR}^{sh}z_{se})}{1+(y_{SR}+y_{SR}^{sh})z_{se}}]V_R \end{aligned} \tag{9}$$

식(7)과 (9)를 이용한 UPFC의 전류주입 모델은 그림 4와 같다. TCSC를 제외한 다른 FACTS모델은 그림 4의 전류주

입 모델에 적용되지만 TCSC는 z_{se}부분에 대한 항을 전류주입으로 변환하여야 한다. 본 논문에서는 이에 대한 식은 생략하기로 한다.

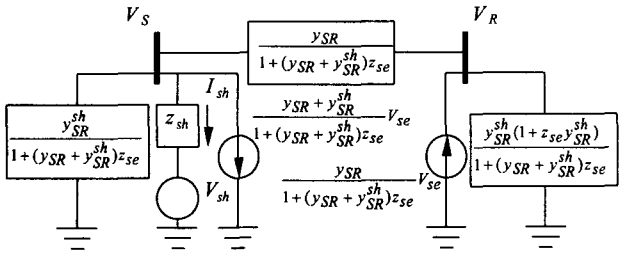

그림 4 UPFC의 전류 주입 모델
Fig. 4 Current Injection Model for UPFC

전류 주입 모델은 어드미턴스 행렬의 대칭성을 유지하면서 FACTS의 특성을 고려할 수 있다는 장점이 있다. FACTS가 어떤 종류일지라도 등가 전류원으로 나타낼 수 있으며 이에 전압을 곱하면 전력원이 되어 발전기나 부하와 같은 역할을 한다. 이 전류원은 전력 조류를 독립 변수가 되어 제어할 수 있을 뿐만 아니라 자코비안 행렬을 다시 계산할 필요가 없다. 단지 발전기나 부하처럼 전력 Mismatch로 간주하면 된다. 그리고 이 전류원은 FACTS의 형태에 따라 FACTS의 제어 변수로 쉽게 변환할 수 있다.

주입 전류를 제어변수로할 때 선로의 조류는 선로가 연결된 모선 S와 R의 전압의 함수일 뿐만 아니라 주입 전류의 함수도 된다. 즉 각 모선에 발전 전력이나 부하 전력이 있는 것과 같이 되지만 실제로는 선로에 흐르는 전력이다. 특히 모선 S에는 FACTS의 직렬부분과 병렬부분의 두 개의 주입 전류가 있으므로 이를 합하여 계산해야한다. V_{se}와 V_{sh}의 값은 Newton법에 의하여 주어진 조건으로 결정된다.

2.2 UPFC의 동특성을 위한 모델

UPFC의 동특성은 그림 1에서 DC 부분의 동특성으로 DC 부분의 캐패시터의 전압 변화 특성을 고려해야 한다. 참고문헌[17, 18]에서 UPFC의 전력 주파수 동적 모델은 다음과 같이 제안한 것을 이용하였다. 캐패시터의 전압과 전류의 관계는

$$I_d = C\frac{dV_{dc}}{dt} \tag{10}$$

$$I_d = I_{dsh} + I_{dse} \tag{11}$$

직류측의 유효전력은

$$P_{sh} = V_d I_{dsh}/S_B \tag{12}$$

$$P_{se} = V_d I_{dse}/S_B \tag{13}$$

이상적인 컨버터라면 교류측의 유효전력은 직류측 유효전력과 같다.

$$P_{sh} = Re(V_{sh}I_{sh}^*) \tag{14}$$

$$P_{se} = Re(V_{se}I_{se}^*) \tag{15}$$

VSC에 PWM기법을 적용 할 때 직류측 전압과 교류측 전압은

$$V_{sh} = m_{sh}V_{dc}/V_B \tag{16}$$

$$V_{se} = m_{se}V_{dc}/V_B \tag{17}$$

여기서 m_{sh}와 m_{se}는 전압 V_{sh}와 V_{se}를 유지하기 위한 PWM계수이고 V_B는 기준 전압이다. 전압 V_{sh}와 V_{se}의 위상 θ_{sh}과 θ_{se}는 점화각 ϕ_{sh}과 ϕ_{se}에 의한 V_S의 위상각 θ_S에 대한 위상이다.

$$\theta_{sh} = \theta_S - \phi_{sh} \tag{18}$$

$$\theta_{se} = \theta_S - \phi_{se} \tag{19}$$

동특성을 나타내는 UPFC의 모델은 식(10)으로부터

$$CV_d\frac{dV_{dc}}{dt} = (P_{sh} - P_{se})S_B \tag{20}$$

이 모델은 다기 계통과 다양한 제어기법을 쉽게 적용할 수 있다. 여기서 각 컨버터의 m_{sh}, ϕ_{sh}와 m_{se}, ϕ_{se}는 제어신호로부터 변화되어 출력 전압의 크기와 위상이 제어된다.

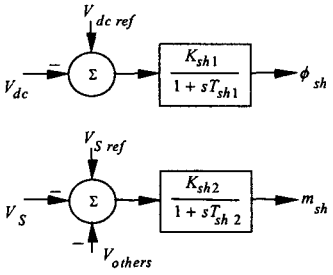

그림 5 병렬 컨버터 제어기
Fig. 5 Shunt Converter Controller

그림 5는 병렬 컨버터의 점화각 ϕ_{sh}는 V_{dc}를 일정하게 유지하고, m_{sh}는 모선 S의 전압을 일정하게 조절하는 것이다. 그리고 V_{others}는 감쇄를 보조 신호로 사용하는 입력신호이다.

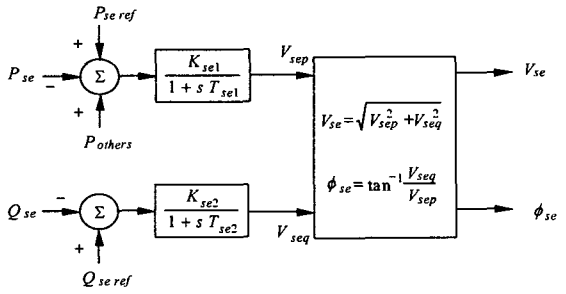

그림 6 직렬 컨버터 제어기
Fig. 6 Series Converter Controller

직렬 컨버터 제어는 선로의 유효전력을 조절하는 부분과 무효전력을 조절하는 부분으로 나누어진다. 그림 6에서 이들은 정상상태의 기준값과 실제값의 차에 의하여 2.1에서 언급된 V_S에 수직인 성분인 V_{sep}와 동상인 성분 V_{seq}를 변화함으로서 선로의 유효전력과 무효전력을 제어한다. V_{sep}와 V_{seq}는 비례 적분기에 의하여 얻어지고 V_{se}의 크기와 위상을 그림 6과같이 계산된다. 또한 V_{se}는 FACTS장치의 제한 값

인 V_{se}max에 의하여 크기가 제한된다.[7]

3. 가용송전용량 계산(ATC)

가용 송전 용량은 계통의 한 지역에서 다른 지역으로 추가로 전송할 수 있는 능력이다. 이것은 현 운전점이 안정도 한계까지 얼마의 여유가 있는지를 나타내는 지표로서 계통 운전자에게 유용하다.

동적인 특성까지 고려한 가용송전용량의 계산을 위하여 본 논문에서 정상 상태에 가용 송전 용량을 계산하고 이 결과를 동적인 상태에서 안정도를 분석하여 안정하게 될 때까지의 송전 용량으로 한다. 그 흐름도는 그림7과 같다. 즉 가장 심각한 상정사고시 전압 안정도 측면에서 융통전력 한계점이 구하여 이점에서 과도 안정도를 검토하고 안정하면 그때가 최대 융통전력이 된다. 그러나 전압 안정도나 과도 안정도 검토시 계통이 안정하지 않으면 안정화를 위한 조치사항(PSS 또는 FACTS의 설치등)을 수행하여 안정화를 시키고 그래도 불안정하면 λ를 감소시켜 반복 실행하여 안정도를 만족할 때까지의 융통전력을 최대 융통전력으로 한다.

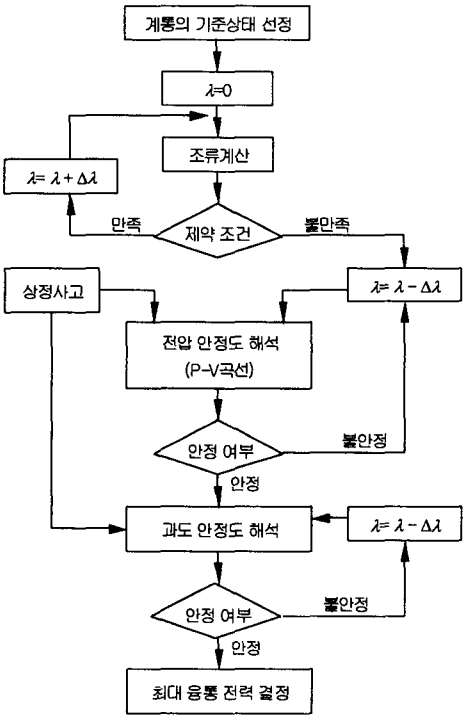

그림 7 최대 융통 전력계산을 위한 흐름도

Fig. 7 Flow Chart for Total Transfer Capability

전력회사들은 가용송전용량(ATC)을 측정하기 위하여 다음과 같은 계산식을 이용하였다.[10]

$$ATC = TTC - TRM - CBM - ETC \quad (21)$$

여기서 전체송전용량(Total Transfer Capability : TTC)은 전력계통의 최악상정사고에서 전력 전송 경로에서 열적인 용량제한, 전압과 안정도에 대한 제한을 만족하는 전체적인 송전 용량을 말한다. 송전 신뢰 여유도(Transmission Reliability Margin : TRM)는 불확실성이 포함된 전력 전송에 필요한 신뢰를 확보하기 위한 여유이다. 여기에는 병렬 경로의 동시 제한, 예상되지 않은 조류 예비력 및 TTC에 포함되지 않는 선로의 상정사고에 대한 예비력 등이다.

설비 편익 여유도(Capacity Benefit Margin : CBM)는 전력 계통의 설비들이 무리 없이 운전할 수 있는 여유를 말한다. 현 전송전력량(Existing Transmission Commitments : ETC)은 현재 운전되고 있는 전력계통에 전송되고 있는 전력량 이다.

정상상태에서 ATC는 여러 가지 방법이 있다. ATC계산에 가장 많이 이용되는 방법은 다음 세 가지가 있다.

1) 연속 조류계산(CPF : Continuation Power Flow) 방법[11, 12]
2) 반복 조류계산(RPF : Repeated Power Flow) 방법
3) 안전도를 고려한 최적조류계산(SCOPF : Security Constrained Optimal Power Flow) 방법

본 논문에서는 조류계산을 반복하여 계산하는 RPF 방법을 사용하여 정상 상태에서 전체 송전 용량을 계산한다. 계산 절차는 다음과 같다.

목적함수 λ

종속함수

$$P_{Gi} - P_{Di} - \sum_{j=1}^{N} V_i V_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) = 0 \quad (22)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - \sum_{j=1}^{N} V_i V_j (G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}) = 0 \quad (23)$$

$$V_i\min \le V_i \le V_i\max \quad (24)$$

$$S_{ij} \le S_{ij}\max \quad (25)$$

여기서

λ : 발전량과 부하량 증가 계수(기준시에 $\lambda=0$이고 최대 전송시 $\lambda=\lambda_{\max}$이다)

P_{Gi}, Q_{Gi} : i모선의 유효, 무효 발전전력

P_{Di}, Q_{Di} : i모선의 유효, 무효 부하전력

V_i, V_j : i,j모선 전압

G_{ij}, B_{ij} : 어드미턴스 행렬의 ij요소

δ_{ij} : 모선 i와 j사이의 전압 위상차

$V_i\max$, $V_i\min$: i모선 전압의 상하한 값

N : 계통의 모선 수

S_{ij} : 선로 ij의 피상 전력

식(22)와 (23)의 전력 방정식에서 P_{Gi}(발전 지역의 유효 발전 전력), P_{Di}(부하 지역의 유효 부하 전력), Q_{Di}(부하지역의 무효 부하 전력)의 변화는 다음과 같다.

$$P_{Gi} = P_{Gi}^0(1 + \lambda K_{Gi}) \quad (26)$$

$$P_{Di} = P_{Di}^0(1 + \lambda K_{Di}) \quad (27)$$

$$Q_{Di} = Q_{Di}^0(1 + \lambda K_{Di}) \quad (28)$$

여기서

P_{Gi}^0 : i모선의 기준시의 발전 유효전력

P_{Di}^0, Q_{Di}^0 : i모선의 기준시의 부하 유효, 무효전력

K_{Gi}, K_{Di} : i모선의 발전량과 부하의 변화율

이 경우의 TTC는

$$TTC = \sum_{i \in 부하지역} P_{Di}(\lambda_{max}) \quad (29)$$

$$ETC = \sum_{i \in 부하지역} P^{0}_{Di} \quad (30)$$

이와 같이 계산됨으로 최대 λ를 결정하는 것이다. 본 논문에서 TRM과 CBM는 무시하고 ATC를 계산하면

$$ATC = \sum_{i \in 부하지역} P_{Di}(\lambda_{max}) - \sum_{i \in 부하지역} P^{0}_{Di} \quad (31)$$

여기서 사용된 프로그램은 K_{Gi}, K_{Di}값을 지역별 또는 모선별로 다른 값을 사용하여 원하는 지역간의 융통전력을 계산할 수 있다.

상정사고는 선로의 과부하 지수와 모선의 저전압강하 지수 또는 전압 불안정 지수에 의하여 일반적으로 선정되고 있으나 본 논문에서는 선로의 과부하 지수와 모선의 저전압 지수로 선정하였다.[16]

4. 모의계통과 실험결과

4.1 모의 계통

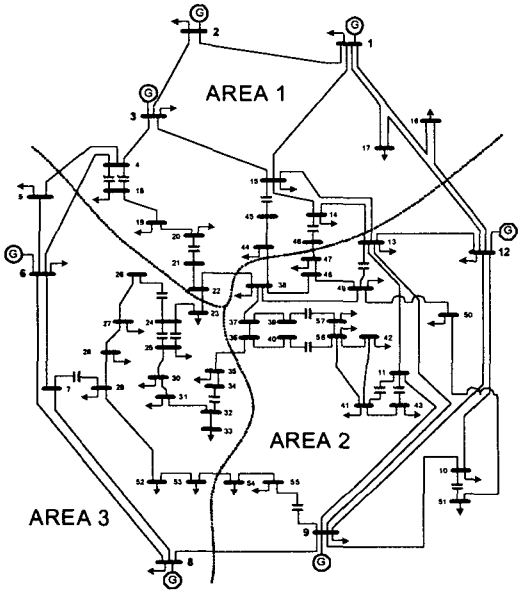

그림 8 IEEE 57모선 계통도
Fig. 8 IEEE 57 Bus System

FACTS를 이용하여 ATC를 증진하기 위한 방법을 IEEE 57모선 계통에 적용하였다. 지역 구분은 그림8과 같이 3개의 지역으로 나누어 실행하였으며 모의실험에 사용한 제약조건은 다음과 같다.

1) 모든 모선의 전압은 0.90 - 1.10범위를 유지해야한다.

2) 선로의 열적 용량한계는 미리 정해진 값보다 적어야 한다.

3) 융통전력을 증가하기 위하여 각 지역의 발전량 또는 부하량을 같은 비율로 증가하게 한다. 기준 시 계통 의 모든 모선 전압은 0.95 - 1.05 사이 있으며 과부하 선로는 없다. 표1은 기준 시 전력계통의 각 지역별 발전량과 부하량이다.

표2는 각 지역간의 융통전력을 나타낸다. 1번 지역과 2번 지역과 2번 지역과 3번 지역의 유통전력은 각각 182.4[MW]와 168.3[MW]이나 1번 지역과 3번 지역은 다른 지역에 비하여 적은 24.4[MW]이다.

표 1 각 지역별 발전량과 부하량
Table 1 Generation and Load of Each Areas

지역	발전량 [MW/MVAR]	부하량 [MW/MVAR]	병렬캐패시터 [MVAR]
1	481.1/167.6	261.3/160.5	4.9
2	330.0/103.8	671.3/114.6	0.0
3	470.0/44.3	323.1/60.8	14.8
총계	1281.1/315.7	1255.7/335.9	19.7

표 2 지역간 융통전력
Table 2 Transfer Power between Areas

지역	1	2	3
1	-	182.4/6.46	24.4/-0.5
2	-180.0/-8.9	-	-164.6/12.0
3	-24.3/-5.2	168.3/0.8	-

4.2 모의 실험 결과 분석

조류계산과 전압안정도 분석에서 P-V곡선으로 정적 전압안정도의 여유를 분석하여 전압안정 여부를 판단한다. 또한 P-V곡선에서 상정사고 발생 시 운전 점의 변화에도 충분한 정적 전압안정도 여유가 확보되는지를 판단한다. 불안정시 해결방안으로 FACTS를 설치하여 전압안정도를 증진하고 조치사항에도 안정도가 확보되지 않으면 λ값을 줄여서 융통 전력량을 감소하고 다시 정적 전압안정도를 분석한다.

이 정적 전압안정도를 만족하면 동적 과도안정도를 분석한다. 과도 안정도 분석에서는 FACTS 제어기의 동적 특성을 포함하여 분석하고 발전기의 위상각뿐만 아니라 각 모선의 전압회복 정도를 분석하여 전력계통의 안정도 특성을 해석한다. 과도 안정도의 불안정 현상에는 발전기 회전자 위상각의 첫째 동요뿐만 아니라 이어지는 동요가 충분한 감쇠가 있는지를 분석한다. 과도안정도를 위한 상정사고는 3상 단락으로 모의실험을 하였다.

CASE 1 : 모든 지역에 발전량과 부하를 같은 비율로 증가해서 융통전력을 증가시켰다. 그 결과 λ가 0.407까지 증가하고 전압이 가장 낮은 모선은 34이었다. 이는 부하를 40.7[%]까지 증가할 수 있다는 것이다. 표 3에서는 Case1의 경우 각 지역간 융통전력을 나타내었다. 이때 유효전력과 전압의 관계는 그림 9와 같다. 미리 설정된 모선 전압 제약조건이 0.9 이하가 발생한 때의 λ는 0.19이었다. 그림 9에서 전압이 갑자기 증가하는 것은 변압기의 탭변환이나 병렬 캐패시터가 자동으로 전압을 조절하기 때문이다.

표 3 전체 발전량 및 부하량 증가시 지역간 융통전력
Table 3 Transfer Power between Areas

지역	1	2	3
1	-	218.2/15.6	29.83/7.375
2	-214.7/-13.7	-	-193.65/14.4
3	-29.7/-12.7	199.1/6.8	-

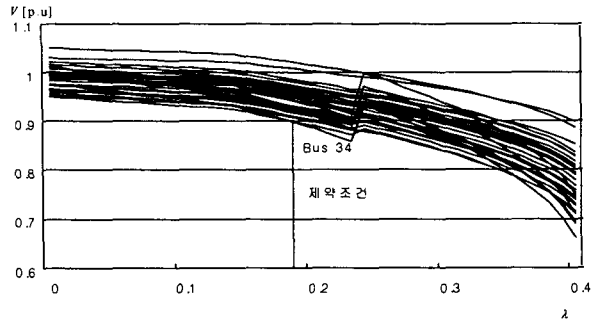

그림 9 모선 전압과 λ곡선

Fig. 9 Voltage and λ Curve

그림 10 8-9 선로 개방 시 모선 전압과 λ곡선

Fig. 10 Voltage and λ Curve (Line8-9 Open)

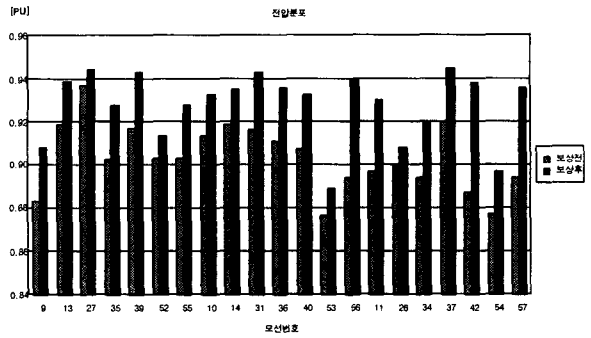

그림 11 STATCOM 적용시 모선전압

Fig. 11 Compensation STATCOM on Bus 43

CASE 2 평균부하 및 과부하시 선로에 사고가 발생하였을 때 대표적인 과부하선로인 8-9선로를 개방하였다. 선로개방시 8-9 선로와 주변 선로도 과부하를 겪게되며(14개 선로) 저전압 모선이 증가하게 된다.(34개 모선) 그림10에서는 선로부하가 큰 선로 8-9를 개방하였을 때의 P-V곡선으로 λ가 0.09까지 증가했다.

그림 11은 보상을 하기 전, 후의 전압을 나타낸 것으로 43번 모선에 무효전력 공급으로 인한 주변 모선의 전압상승 효과를 나타내었다.

그림12는 발전량과 부하를 증가하지 않고 선로 8-9에 3상 단락 사고시 계통의 상대 위상각을 나타내고 있다. 상정사고는 모의실험 시작 후 0.2초에서 발생하고 0.08초(5Hz)를 지속하다가 제거되고 그 선로는 개방하였다. 1차적인 동요가 발생하고 점차 감쇄되고 있음을 나타내고 있다.

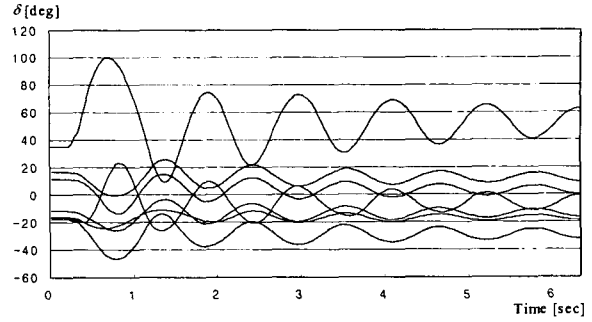

그림 12 기준시 발전기 위상각(선로 8-9 사고)

Fig. 12 Genertor Angle of Base Case (Line 8-9 fault)

그림 13은 같은 사고시 모선 전압을 나타낸 것으로 초기 1초에서는 전압이 회복되지 않고 있다가 그 후부터 회복되어 동요하고 있다.

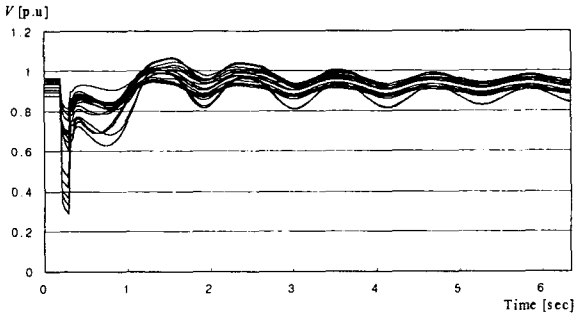

그림 13. 기준시 모선 전압(선로 8-9 사고시)

Fig. 13 Bus Voltage Magnitude(Line 8-9 Fault)

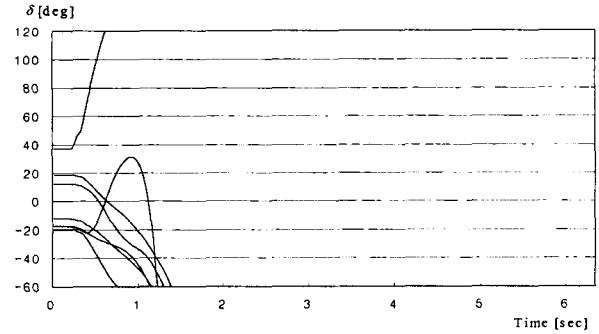

그림 14 발전기 위상각 (λ=0.91)

Fig. 14 Generator Angle (λ=0.91)

λ가 0.91증가시의 안정도는 그림 14, 15와 같다. 이 결과에 따르면 발전기 위상이 두 개의 그룹으로 분리된다. 모선 8에 연결된 발전기가 다른 발전기와 분리되어 과도안정도가 불안정함을 보이고 있다. 또한 모선 전압도 심하게 동요하고 있다.

그러므로 이러한 불안정을 안정화하기 위하여 UPFC를 추가하여 모의 실험한 결과는 그림16과 같다. 그 결과는 안정하게 나타나고 있다. UPFC의 데이터는 다음과 같다.

T_w = 0.3, K = 100, T_1 = 0.1,

T_2 = 0.2, T_3 = 0.1, T_4 = 0.2

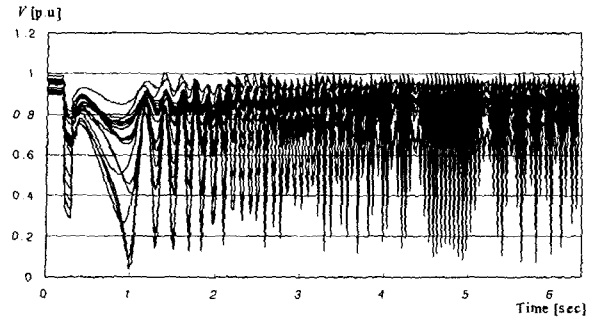

그림 15 모선 전압 (λ=0.91)

Fig. 15 Bus Voltage (λ=0.91)

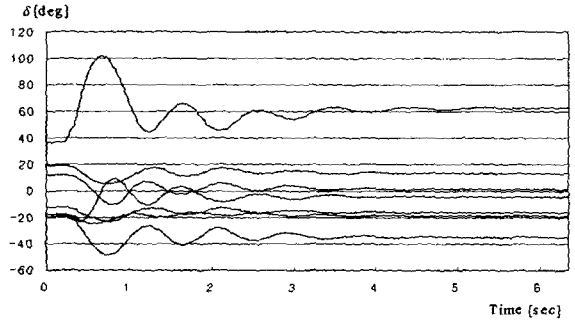

그림 16 FACTS(UPFC)설치시 발전기 위상각

Fig. 16 Generator Angle with FACTS(UPFC)

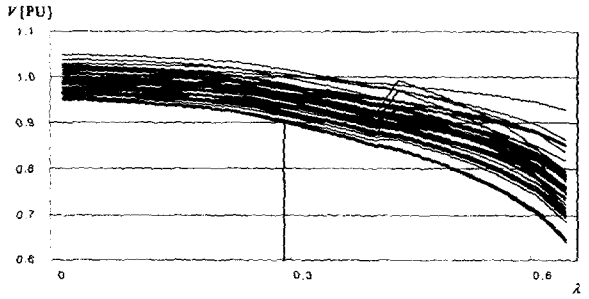

그림 17 모선 전압과 λ곡선

Fig. 17 Voltage and λ Curve

CASE 3 : 그림 17에서는 1번 지역은 발전량을 2번 지역은 부하량을 일정 비율로 증가시켰을 경우이다. 1번 지역의 발전량을 증가시키기 위하여 식(26)의 K는 1.0이고 2번 지역의 부하량을 증대시키기 위한 식(27)의 K는 0.805를 사용하였다. 이때 λ는 0.636까지 증가하고, 모선 전압이 0.9[pu]까지의 λ는0.275이다. 이 경우가 전 지역의 부하를 증가 시켰을 때보다 λ는 더 증가되었으며 지역간 융통전력은 표4와 같다. 이 결과에 따르면 지역1과 지역2사이의 융통전력이 317.1로 증가했고 지역1과 3지역도 43.84로 증가했다. 이는 2지역의 부하증가로 1번지역의 발전량이 3번 지역을 통해서 전송되는 것이다.

그림 18은 저전압 모선인 31번에 STATCOM을 설치한 경우로 λ는 0.705로서 설치전보다 0.069가 증가되었다. 모선 전압이 0.9인 경우에는 λ는 0.307로서 설치전보다 0.032만큼 증가했다.

표 4 지역간 융통전력

Table 4 Transfer Power between Areas

지역	1	2	3
1	-	317.10/14.39	43.84/-0.63
2	-310.96/-1.93	-	-183.10/-0.19
3	-43.56/-4.24	187.72/17.93	-

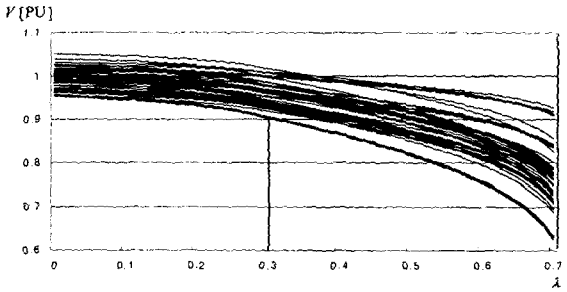

그림 18 모선 전압과 λ곡선

Fig. 18 Voltage and λ Curve

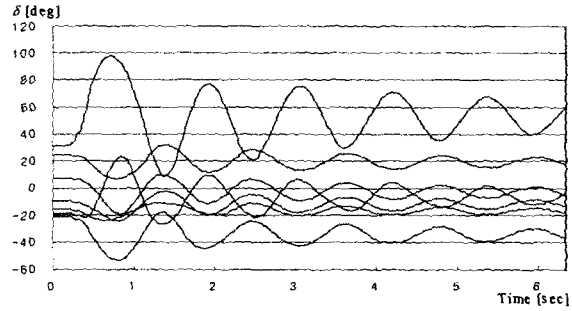

그림 19 발전기 위상각(선로8-9사고)

Fig. 19 Generator Angle(Line 8-9 fault)

CASE 3에서 8-9번 선로 사고시 전압안정도 여유를 증진하기 위한 조치로 모선 44번, 54번에 STATCOM을 설치했을 때 λ는 최대 0.483이고 전압이 0.9일 때 λ는 0.428이다. 그리고 이때의 과도안정도를 그림 19에 나타냈는데 과도안정도는 안정하게 나타나서 λ를 증가시킬 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 FACTS가 있는 계통에 전류주입 방법을 이용한 전력조류계산 기법을 제시하였다. 이 방법은 FACTS 설비의 내부 루프에 Newton법을 적용하여 이미 개발된 프로그램은 많은 변경 없이 FACTS설비에만 적용할 수 있는 장점은 있지만 반복 횟수가 증가하는 단점이 있다.

또한 전력 계통의 동적 특성을 고려한 가용 송전 용량(ATC) 계산 방법을 제안하였으며 계통에 FACTS을 적용하면 융통전력이 증진되는 것으로 나타났다. 그러나 FACTS의 설치 위치와 적절한 정수 설정에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] North American Electric Reliability Council(NERC), "Available Transfer Capability Definitions and Determination," June 1996.

[2] G. C. Ejebe, J. Tong, J. G. Waight, J. G. Frame, X. Wang, and W. F. Tinney, "Available transfer capability calculations," IEEE Trans. on PS vol. 13, no. 4, 1998, pp. 1521-1527.

[3] J. B. Choo, B. H. Chang, H. S. Lee, H. S. Shin, K. K. Koh, "Development of FACTS operation technology to the KEPCO power Network," Transmission and Distribution conference and exhibition 2002 IEEE/PES vol. 3, 6-10 Oct. 2002, pp. 2008-2012.

[4] B. A. Renz, A. Keri, A. S. Mehraban, C. Schauder. E. Stacey. L. Kovalsky, L. Gyugyi, A. Edris, "AEP Unifierd Power Flow Controller Performance," IEEE Trans. on PD, vol. 14, no. 4, Oct. 1999 pp. 1374-1381.

[5] Z. X. Han, "Phase Shifter and Power Flow Control," IEEE Trans. on PAS, vol. 101, no. 10, Oct. 1982, pp. 3790-3795.

[6] M. Noroozian, G. Anderson, "Power Flow Control by use of Controllable Series Components," IEEE/PES Summer Meeting, Seattle, WA. July, 1992, pp. 12-16.

[7] N. Srinivasan, K. S. Prakasa Rao, C. S. Injulkar, S. S. Venkata, "On-Line Computation of Phase Shifter Distribution Factors and Line Load Allevation," IEEE Trans. on PAS, vol. 104, no. 7, July, 1985, pp. 1656-1662.

[8] Fuerte-Esquival, C. R. Acha, "Newton-Raphson Algorithm for the Reliable Solution of Large Power Networks with Embedded FACTS Devices," Proc. IEE Pt. C, vol. 143, no. 5, 1996 pp. 447-454.

[9] S. Arabi, P. Kundur, "Versatile FACTS Device Model for Power Flow and Stability Simulation," IEEE Winter Meeting, 1996.

[10] Kalyan K. Sea, Eric J. Stacey, "UPFC-Unified Power Flow Controller: Theory, Modeling, and Application," IEEE Trans. on PD, vol. 13, no. 4, Oct. 1998 pp. 1453-1460.

[11] L. Gyugyi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, D. R. Edris, "The Unified Power Flow Controller: a New Approach to Power Transmission Control," IEEE Trans. on PD, vol. 10, no. 2, April 1995 pp. 1085-1093.

[12] K. S. Smith, L. Ran, J. Penman, "Dynamic Modelling of Unified Power Flow Controller," IEE Proc. GTD vol. 144, no. 1, Jan. 1997 pp. 7-12.

[13] Z. Huang, Y. Ni, C. M. Shen, F. Wu, S. Chen, B. Zhang, "Application of Unified Power Flow Controller in Interconnected Power Systems - Modeling, Interface, Control Strategy, and Case Study," IEEE Trans. on PS, vol. 15, no. 2, May 2000 pp. 817-824.

[14] H. Chiang, A. J. Flueck, K. S. Shah, N. Balu, "CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior due to load and generation variations," IEEE Trans. on PS vol. 10, no. 2, 1995, pp. 623-634.

[15] Yan OU, Chanan Singh, "Assessment of Available Transfer Capability and Margins," IEEE Trans. on PS, vol. 17, no. 2, May, 2002, pp. 463-468.

[16] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, Inc., pp. 430-432, 1996.

저 자 소 개

김 양 일 (金 良 一)

1971년 7월 24일생. 2000년 순천대 물리학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2002년~현재 동 대학원 박사과정

E-mail : kimyi007@hanmail.net

정 성 원 (鄭 盛 元)

1975년 11월 26일생. 2002년 순천대 전기제어공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정

E-mail : ww180@sunchon.ac.kr

기 경 현 (奇 坰 炫)

1972년 11월 29일생. 1999년 순천대 전기제어공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

E-mail : kyung1@hanmail.net

김 재 현 (金 在 顯)

1956년 1월 25일 생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사)

1993년 동 대학교 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 전기제어공학과 부교수

Tel : 061-750-3545

Fax : 061-752-9841

E-mail : jhg@sunchon.ac.kr