

### 반복 조류 계산 기법에 의한 STATCOM 적용 전력시스템의 전압 안정도 향상 연구

이세정, 이병하  
인천대학교 전기공학과

원종률  
한전 전력연구원

#### A Study on Voltage Stability Enhancement of Power Systems with STATCOM using Repeated Power Flow Method

Se-Jung Lee, Byung-Ha Lee

Jong-Ryul Won

Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon

Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - The STATCOM(Static Compensator) resulted from the FACTS technology can generate or absorb reactive power rapidly so as to increase the transient stability and voltage stability. In this paper, effects of application of the STATCOM to the power system are analyzed from a viewpoint of improving voltage stability. The voltage stability is analyzed by use of repeated power flow method. The IPLAN, which is a high level language used with PSS/E program, is employed for evaluating the voltage stability.

전압 안정도를 해석하고, STATCOM 적용시의 전압 안정도 향상 효과에 대해 분석한다.

### 2. STATCOM 동작 특성 및 모델링

STATCOM은 그림 1에 보인 것처럼, 3상 전압원 인버터와 에너지 저장용 직류 커패시터 그리고 제어회로로 구성되어 있으며, 3상 출력전압은 교류계통 전압과 위상이 일치하도록 연속적으로 제어 된다. 증가적으로는 크기와 위상을 신속하게 조절할 수 있는 3상 전압을 변압기의 누설 리액턴스를 통하여 계통에 인가하는 장치로 볼 수 있다. 계통 선간 전압이 평형인 경우, 계통으로부터 STATCOM으로 유입되는 유효전력의 합계는 항상 0이 됨으로, 이론적으로는 에너지 저장요소인 직류 커패시터를 필요로 하지 않으나 지속적으로 무효전력의 흡수 및 공급을 위해서는 교류와 직류 단자간에 순간에너지 평형을 유지하기 위한 적은 용량의 직류 커패시터를 필요로 한다. STATCOM의 컨버터와 교류계통 사이에 교환되는 무효전력의 양은 컨버터 출력전압의 크기 변화에 따른다. 만일 출력전압의 크기( $V_0$ )가 교류계통 전압의 크기( $V$ ) 이상으로 증가 했을 때는 즉 그림 1에서  $V_0 > V$ 이면, 컨버터는 진상 리액티브 전류를 계통에 공급하고, 컨버터 출력전압이 교류계통 전압보다 낮으면 즉  $V_0 < V$ 이면, 컨버터는 계통으로 지상 리액티브 전류를 흡수한다. 또한 컨버터의 출력전압이 교류계통의 전압과 동일하면 무효전력의 출입은 0가 된다. 인버터의 출력전압이 교류계통전압보다 진상이면 STATCOM은 유효전력을 교류계통에 공급하고 이때 직류 커패시터에 저장된 에너지가 계통으로 방출하게 되며, 인버터의 출력전압이 교류계통전압에 대해 지상이면 교류계통으로부터 유효전력을 흡수하여 직류 커패시터에 에너지를 저장한다. STATCOM의 V-I 특성이 그림 2에 보여져 있다. STATCOM은 스위칭 회로에 재래식 싸이리스터 대신에 GTO(Gate Turn Off) 싸이리스터를 사용한다. STATCOM은 전압강하에도 상관없이 무효전력 공급량을 일정하게 유지할 수 있는 반면, 유사한 기능을 갖는 SVC는 출력전류가 시스템 전압의 감소에 비례하는 커패시터와 리액터로 구성되어 있으므로, STATCOM이 전압을 지지하는 면에서 SVC보다 우수하다.

### 1. 서 론

환경적인 제약조건, 각종 규제의 제약조건, 경제적인 제약조건들과 지역이기주의의 확산 등으로 전력송전설비의 건설이 갈수록 더 어려워져 가고 있는 상황이나, 생활수준의 향상 등으로 전력수비는 앞으로 상당기간 동안은 지속적으로 증가해 갈 것이 예상되어서 수급전력이 전력계통의 설비의 용량 한계에 점차 접근해 가고 있다. 또한, 경쟁체제로 전환된 우리 나라의 전력계통은 지역적 특성상 서해안지역, 호남지역, 영남지역 등의 원거리 발전군과 대규모 부하밀집지역인 경인지역으로 나눌 수 있고, 이들간의 원활한 전력수급을 위하여 용통전력인복상조류가 이루어지는데, 상당한 규모의 복상조류가 흐르는 345kV 이상 송전선로는 이미 중부하되고 있는 실정이다. 이 용통전력의 평가는 열 안정도, 과도안정도, 전압안정도, 미소신호 안정도 평가를 함으로써 결정되는데 [1-2], 한전 시스템의 경우 주로 전압 안정도에 의해 제한을 받게된다. 따라서, 송전선로 확보공간을 보다 효율적으로 사용하여 전력전송과 계통안정화를 극대화하기 위한 노력이 요구되고 있는데, 이를 위한 새로운 방안 중의 하나가 FACTS 기술이다. FACTS 기술은 최근 비약적으로 발전하고 있는 전력용 반도체 기술과 컴퓨터에 의한 고속 제어기술을 이용하고 있는데, GTO로 구성된 전압원 컨버터를 이용한 2세대의 대표적인 FACTS 장치가 STATCOM(Static Compensator)이다 [3-4]. STATCOM 포함시의 전력시스템에 대하여 대규모 시스템의 전력 조류 계산 프로그램에도 쉽게 수정하여 적용할 수 있도록 모델링한다. PSS/E 프로그램의 보조 프로그램인 IPLAN 프로그램을 사용하여 프로그램을 작성하고, FACTS 설비가 포함된 전력 시스템의 전력 조류계산을 수행한다. 반복 조류계산 기법을 사용하여

STATCOM의 작동을 주입된 리액티브 전류원으로 모델링할 수 있고, 대규모 전력계통안정도 해석에서 이 STATCOM의 동적인 특성은 시 지연을 반영한 1차 또는 2차 모델로 간략화하여 고려할 수 있다. 전력조류계산에서는 정적인 정상상태의 해를 구하는 문제이므로, 여기서는 STATCOM을 그림2에서와 같은 무효전력의 공급의 한계치를 갖는 무효전력을 공급하는 전원으로 모델링한다.

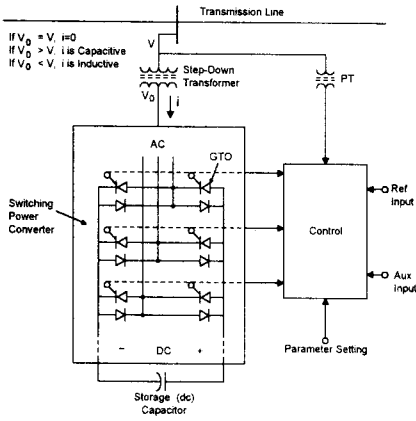


그림 1. STATCOM의 구성

REACTIVE V-I CHARACTERISTICS OF STATIC CONDENSER

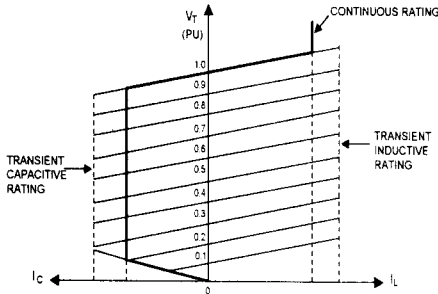


그림 2. STATCOM의 V-I 특성

### 3. 조류 계산에 근거한 전압 안정도 평가 기법

#### 3.1 연속 조류 계산 기법

일반적인 정적 전력시스템은 아래의 형으로 표현될 수 있다.

$$0 = f(x, \lambda) = f(x) - \lambda b \quad (1)$$

여기서  $\lambda \in R^1$ 은 변화에 종속하는 매개 파라미터이고,  $b \in R^n$ 는 유·무효 전력 부하에서의 변화와 유효

전력 발전에서의 변화를 나타낸다. 위 시스템은 1 파라미터 비선형 시스템이다.

곡선 추적이나 경로 추적이라 불리는 연속 조류 계산 기법(CPF)은 변하는 파라미터가 있는 일반적인 비선형 대수 방정식에 대한 해의 곡선을 발생시키는 데 유용한 기법인데, 특히 전압 붕괴점 부근에서 자코비안이 특이값을 가짐으로써 해를 구하기 어려운 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다[5]. 연속법은 •파라미터화 과정 •예측 과정 •수정 과정 •단계 크기 조절 과정의 4가지의 기본 과정들을 가진다.

파라미터화 과정은 다음의 해나 이전의 해가 정량화될 수 있도록 제어 파라미터를 수식에 포함되게 하여 해의 곡선 상에서 각 해를 풀어나가는 수학적인 방법이다. 예측과정의 목적은 다음해에 대한 근사점을 찾는 것이다. 더 좋은 예측 점은 해를 쉽게 구하고, 수정 과정에서 정확한 해를 구하기 위해 필요로 하는 반복 회수를 줄이게 된다. 예측 과정에서 다음 해를 위한 근사해를 산출한 후 에러가 축적되기 전에 정확한 해의 값을 구하는 수정과정을 거쳐야 한다. 그리고, 연속법과 관련한 계산 효율에 영향을 미치는 하나의 주요한 요소는 단계 크기의 조절이므로, 계산 과정에 따라 적절한 단계 크기를 적용하도록 한다. 부하가 증가함에 따라 이러한 과정들을 반복하여 적용함으로써 P-V 곡선을 완성하게 된다.

### 3.2 곡선 추정 기법

이 접근 방법은 전압붕괴점을 찾아내는데 있어 2차 다항식의 곡선 추정 방식을 이용하는 방식이다[6]. 안정한 영역의 3개의 조류 해로써 다항식의 계수를 추정하며 첫 번째 점은 현재의 운전점을, 두 번째와 세 번째 점은 CPF 또는 다른 조류계산 방법을 이용하여 얻어낸다. 추정되는 다항식은

$$\lambda_i = a_{1i}x_i^2 + a_{2i}x_i + a_{3i}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

으로 표현할 수 있으며, 추정된 전압 붕괴점  $\lambda^*$ 는

$$\lambda^* = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i^*}{n_c} \quad (3)$$

로 표현된다.

여기서  $\lambda_i^* = -(a_{2i}^2/4a_{1i}) + a_{3i}$ 이며,  $n_c$ 는 변화된 부하의 총 개수를 의미한다. 이 방법은 CPF에 비해 계산량을 크게 줄여 쉽게 P-V 곡선을 추정하여 낼 수 있지만, 세 개의 조류해의 위치에 따라 곡선의 정확성이 달라지게 되며 상당한 오차를 포함할 수 있다.

### 3.3 반복 조류 계산 기법

반복 조류 계산 기법은 통상적인 조류계산 프로그램을 사용하여 부하를 증가시키면서 조류계산이 발산되어 더

이상 해를 구할 수 없을 때 까지 반복하여 조류계산을 수행함으로써 P-V 나 f-V 곡선을 구하는 방법이다. 이 방법으로는 정확한 전압 붕괴점인 노우즈 점을 계산할 수는 없으나, 실용적인 관점에서 충분한 정도의 근사적인 전압 붕괴점을 구할 수 있다. 널리 공인된 조류계산 프로그램을 사용함으로써 프로그램 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성이 보장된다는 장점이 있다. 본 논문에서는 PTI 사에서 개발한 IPLAN 프로그램을 이용하여 반복조류계산 기법을 구현한다. IPLAN은 PSS/E의 사용에 유연성과 확장성을 제공하기 위해 개발한 독립적으로 사용이 가능한 고급언어인데, PSS/E와 결합하여 사용할 경우 PSS/E의 각종 명령어(activity 명령어)들을 효율적으로 조작할 수 있게 된다. PSS/E 내의 여러 조류계산 모듈 중에서 Full Newton-Raphson 법인 FNSL activity를 사용하여 조류계산을 행한다.

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문의 적용 전력 시스템은 그림 3에 보여져 있는 19모선 전력 시스템이다. 발전 모선은 7개 모선이고, STATCOM은 500모선에 설치되어 있다. 부하가 증가함에 따라 모선전압의 변화가 어떻게 진행되는지 IPLAN 소프트웨어 툴을 사용하여 PSS/E 조류계산 프로그램 계산을 자동적으로 수행하고, 그 시뮬레이션 결과를 그림 4에 나타내었다. STATCOM이 설치되지 않았을 때와 STATCOM이 모선 500에 설치 되었을 때에 부하의 변화에 따른 모선전압의 궤적이 비교되어 있다. 모선 800, 모선 400, 모선 700의 PV 곡선들이 그려져 있는데, 각각 왼쪽 궤적이 STATCOM이 설치되지 않았을 때의 P-V 곡선이고 오른쪽 궤적이 STATCOM이 설치되었을 때의 P-V 곡선이다. 표 1에 STATCOM 설치시와 미설치시에 대한 근사 전압붕괴점에서의 유효전력(P)과 전압(V)의 값들이 제시되어 있다. STATCOM이 설치되면 모선 전압이 상승하고 전압 붕괴점까지의 부하증가에 대한 여유도가 크진다는 것을 나타내주고 있으며, 이는 전압 안정도를 향상 시킨다는 것을 보여준다.

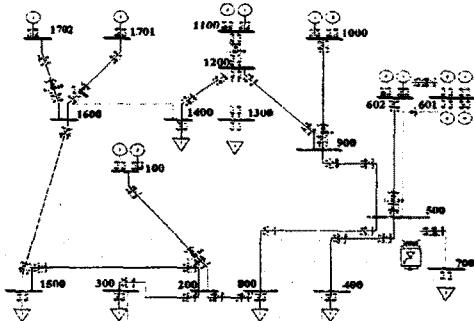


그림 3. 19모선 전력시스템

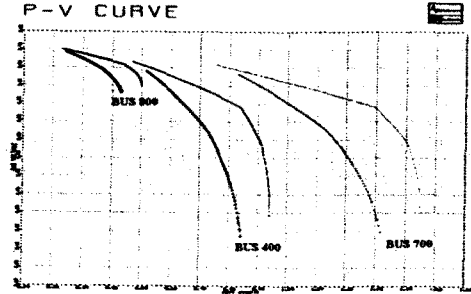


그림 4. STATCOM 설치시와 미설치시의 P-V곡선 비교  
(모선 400, 700, 800)

표 1. 근사 전압 붕괴점에서의 P-V값 비교

	유효전력(P)			전압(V)		
	400	700	800	400	700	800
STATCOM 미설치	0.855	1.276	0.527	0.691	0.699	0.874
STATCOM 설치	0.996	1.590	0.589	0.791	0.891	0.889

#### 5. 결 론

본 논문에서는 PTI 사에서 개발한 IPLAN 프로그램을 이용하여 반복조류계산 기법을 구현한다. 부하가 증가함에 따른 모선전압의 변화 궤적을 구하기 위해 IPLAN 소프트웨어 툴을 사용하여 반복적인 PSS/E 조류계산 과정을 자동적으로 수행하였다. 19 모선 전력 시스템에 적용하여 STATCOM이 설치된 경우의 전압 안정도 향상 효과를 분석하였다. STATCOM이 설치되면 모선전압이 상승하고 전압붕괴점까지의 부하증가에 대한 여유도가 커지고, 결국 전압 안정도를 향상 시킨다는 것을 보여준다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] P.W. Sauer, K.D. Demaree and M.A. Pai, "Stability limited load supply and interchange capability", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-102, No. 11, pp. 3637-3643, Nov., 1983.
- [2] James D. McCally, John F. Dorsey, Zhihua Qu, "A new methodology for determining transmission capacity margin in electric power systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, pp. 944-951, Aug., 1991.
- [3] R.W. Menzies and Y. Zhuang, "Advanced static compensation using a multilevel GTO thyristor inverter", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 10, No.2, pp.732-738, 1995.
- [4] Einar V. Larsen, Daniel J. Leonard, Nicholas W. Miller, Hisham Othman, John J. Paserba, Steven T. Naumann, "Application studies for a distribution STATCON on Commonwealth Edison's Power System", FACTS Conference 2, EPRI TR-101784, Dec 1992.
- [5] H.D. Chiang, K.S. Shah and N. Balu, "CPFLOW: A practical tool for tracing power system steady-state stationary behavior 열 새 load and generation variations", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 10, No.2, pp.623-634, 1995.
- [6] Z. Jia and B. Jayasurya, "Contingency ranking for on-line voltage stability assessment", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 15, No.3, pp.1093-1097, 2000.