

전압플리커 저감과 역률 보상 기능을 갖는 배전용 STATCOM의 실제통연계 운전결과 분석

오관일, 전영수, 박상태, 추진부
전력연구원 전력계통연구실 계통안정화그룹

Analysis of the Distribution STATCOM for Improving the power factor and Mitigation of Voltage Flicker in Real System

Kwan-Il Oh, Young-Soo Jeon, Sang-Tae Park, Jin-Boo Choo
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - This paper presents the test and operation results of the domestic demonstration of the reactive power compensation device called STATCOM (STATic COMPensator). The object of the paper is to describe the reliability of the unit based on the extensive operation databases. By controlling reactive power, the technology offers utilities the opportunity for increased efficiency and their capabilities will permit transmission planners make the best use of their existing transmission resources. STATCOM is a custom power device in a way and can be used in a similar way for the dynamic compensation of power transmission systems, mitigation of voltage flicker and improving the power factor. It is shown that the STATCOM has clear advantages in areas such as: mitigation of voltage flicker and improving power factor.

1. 서 론

최근 산업이 고도화되고 국민 생활의 질적 향상에 따라 가전제품과 컴퓨터 등과 같은 전력변화장치를 사용하는 기기와 정밀제어 기기 등의 광범위한 사용으로 비선형 특성을 갖는 부하가 급증하여 전원 파형을 왜곡시키는 고조파, 역률 저하는 물론, 전력 기기의 상호교란, 온도상승 등 많은 문제를 발생시키고 있다. 또한 일반적으로 전기로, 전기용접기, 대형 전동기와 같이 무효전력 소비에 변동이 심한 부하는 전력계통의 선간 전압을 교란시키거나 전압 플리커를 발생시킨다. 인간의 눈은 0.3%에서 0.4%의 전압변동에 대하여 5Hz에서 20Hz의 변조 주파수에 가장 민감한 것으로 보고되고 있다. 이와 같이 고조파와 전압 플리커에 의해서 발생하는 많은 문제들은 전력계통의 전력품질을 저하시키는 주요 원인이다. 21세기를 바라보는 현재 한국의 전력시장은 독점체제에서 경쟁체제로 전환을 준비해야 하는 시기이며 이러한 경쟁체제에서 선진 외국기업의 기술적 침투로부터 국내 전력장치를 지키기 위해서는 고품질전력에 대한 수용가의 요구에 부응해야 하고 전력시스템의 기술경쟁력을 확보해야 한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 EPRI에 의해 제안된 FACTS가 있으며, 배전급의 1~10MVA FACTS기기들은 이미 실증시험 통해 그 성능을 입증하고 상용운전중인 적용사례가 많으며, 송전급의 수십MVA에서 수백MVA의 STATCOM, SSSC, UPFC 등에 대한 실증시험도 활발하게 진행되고 있다. 또한 배전계통에서의 FACTS를 일명 Custom Power라 한다. Custom Power의 목적은 순간정전이 없고, 전압 Sags나 Swell에 대한 견고한 전압 조정이 되며 고조파가 작은 전력을 사용자에게 공급하는 것이며, 이에 대한 많은 수행되었으며 상용화를 위한 기기의

크기를 작게 하며 중량을 줄이는 Custom Power기기의 컴팩트화에 대한 연구가 본격화되고 있다.^(1,2) 이에 한국전력공사 전력연구원의 주도하에 수년 전부터 FACTS에 대한 연구가 진행되었으며 효성중공업과 함께 국내 최초로 Custom Power기기인 1MVA STATCOM을 개발하여 실제통에 적용하여 운전중이다. 이를 위해 먼저 STATCOM 기기 신뢰성 확보를 위한 모듈별 테스트와 게이트 신호 발생시험 등을 완료한 후 창원 효성 제1공장 내에 기기를 설치하고 용량성 동작과 유도성 동작 및 역률보상 시험을 완료하였으며, 경남 가야변전소 구내에 설치하여 배전선로에 발생하는 전압플리커 저감 시험을 수행하였으며, 향후 고조파 저감 시험을 계획하고 있다.

2. 본 론

2.1 STATCOM의 제어원리
2.1.1 STATCOM의 전압플리커 저감제어

다음의 그림 1은 전압플리커 저감기능을 설명하기 위한 간단한 계통도이다. E는 모선전압을 나타내며 V는 부하단의 전압이다. 이 사이의 전압 강하를 야기하는 선로임피던스를 Z_s로 등가화하였고 부하는 어드미턴스 Y_L로 나타내었으며 STATCOM은 제어대상 선로에 병렬로 연결되어 있다.

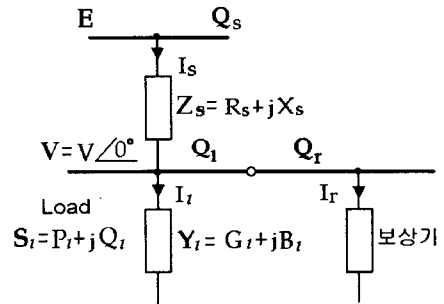


그림 1 전압안정도 개선기능을 설명하기 위한 간단한 계통도

Fig. 1 Simple power system for explanation of function for improvement of voltage stability

우선 모선과 대상선로 사이의 전압을 ΔV라 하면 이는 다음 식과 같이 표현할 수 있다

$$\Delta V = E - V = Z_s I_L \tag{1}$$

$$S = VI^* \text{ , } S^* = V^* I \tag{2}$$

$$I_L = \frac{P_L + jQ_L}{V} \tag{3}$$

복소전력을 나타내는 식(1)로부터 I_L 을 구하면 식(3)과 같으며 이와 식(1)을 이용하여 ΔV 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta V &= R_s + jX_s \left(\frac{P_L + jQ_L}{V} \right) \\ &= \frac{(R_s P_L + X_s Q_L)}{V} \\ &\quad + j \frac{(X_s P_L - R_s Q_L)}{V} \\ &= \Delta V_R + \Delta V_X \end{aligned} \quad (4)$$

즉, 실수부와 허수부의 성분으로 나타낼 수 있다. 또한 그림 2를 보면 모선전압 E 로부터 선로 임피던스 Z_s 에 의한 전압강하 ΔV 만큼 감소한 것이 V 임을 알 수 있고, ΔV 는 식(5)로 다시 나타낼 수 있다. ($V = V \angle 0$ 기준벡터임)

$$\Delta V = I_s R_s + jI_s X_s \quad (5)$$

STATCOM이 없을 경우 $I_s = I_L$ 이므로 ΔV 는 선로전류 I_s 와 부하전류 I_L 는 방향이 같음을 알 수 있다.

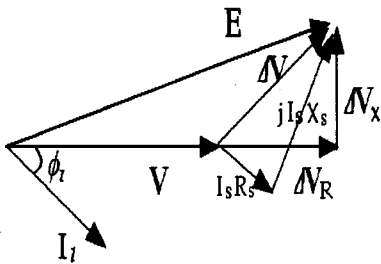


그림 2 STATCOM이 없을 때의 Phasor 도
Fig. 2 Phasor diagram without STATCOM

STATCOM을 추가하였을 경우 다음 식이 성립한다.

$$I_s = I_L + I_r \quad (6)$$

그림 3은 STATCOM이 추가되었을 경우를 나타낸다. 부하가 일정한 상태에서 I_L 의 크기와 위상각이 고정되었다고 하면, 진상전류를 흐르도록 하는 용량성 보상기를 추가함으로써 보상기전류 I_r 의 크기를 조절하여 I_s 의 위상각을 변화시킬 수 있다. 따라서 식(5)로부터 ΔV 의 크기와 위상각이 변화하는데 이는 ΔV 의 조절로써 PCC전압 V 를 순시적으로 제어하여 전압플리커 저감 기능을 만족시킬 수 있음을 의미한다. 즉, STATCOM에 의해 공급된 무효전류를 통하여 선로에 흐르는 전류의 위상을 제어하면 PCC전압을 제어할 수 있다.⁽⁴⁾

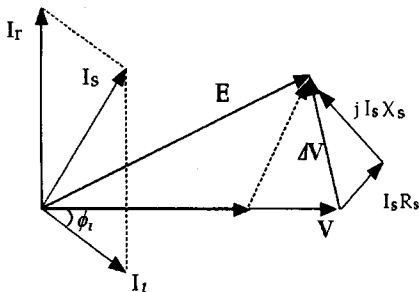


그림 3 PCC 전압제어 Phasor 도
Fig. 3 Phasor diagram of PCC voltage control with STATCOM

2.1.2 STATCOM의 역률보상제어

역률개선 기능을 설명하기 위하여 간단한 계통도를 다음의 그림 4에 나타내었으며, 부하단 지점의 역률을 개선하기 위하여 STATCOM(보상기)을 병렬로 추가되어 있다.

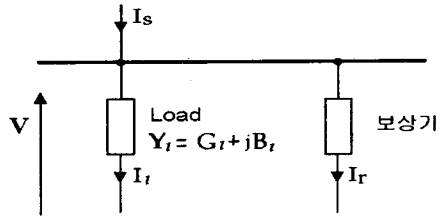


그림 4 역률개선 개선기능을 설명하기 위한 간단한 계통도

Fig. 4 Simple power system for explanation of function for improvement of power factor

부하전류 I_L 은 다음 식 (7)과 같고 실수부 I_R 과 허수부 I_X 의 성분으로 표현되는데, 이에 대한 벡터도가 그림 5에 나타나 있으며 부하의 R (G), X (B) 의 성분에 의하여 ϕ_l 이 결정된다.

$$I_l = V (G_l + jB_l) = VG_l + jVB_l = I_R + jI_X \quad (7)$$

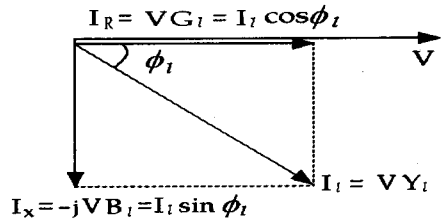


그림 5 임의부하에서 전압 및 전류 벡터도
Fig. 5 Vector of voltage and current in any load

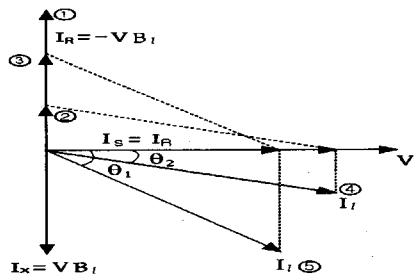


그림 6 역률개선 기능의 벡터도
Fig. 6 Vector of function for improvement of power factor

그림 6은 역률개선 기능의 벡터도로써 선로전류 I_s 와 부하단 전압 V 의 위상이 동상이 되도록 제어됨을 알 수 있다. 부하는 유도성부하로써 지상전류가 흐르도록 가정하였고 따라서 STATCOM(보상기)의 전류는 용량성 진상전류가 되어야 효과적인 역률제어가 가능함을 알 수 있다. 어떠한 부하상태에서 부하전류 I_L 의 크기와 방향이 ⑤와 같이 정해졌다고 하

면 이 때의 보상기 전류 I_s , 벡터의 크기와 방향은 ③과 같을 때에 전압 V 와 전류 I_s 의 동상을 유지할 수 있게 된다. 또한 이 상태에서 I_s 을 ①과 ②와 같이 크기를 조절하면 선로 전류 I_s 를 진/지상으로 변화가 가능함을 알 수 있다. 결국 보상기 전류 I_s 의 크기를 제어함으로써 역률제어가 가능하며, 여기서는 부하단이 지상전류를 야기할 경우만의 예를 설명하고 있지만 용량성 부하일 경우도 보상기를 유도성으로 동작 시킴으로써 역시 역률제어가 가능함을 알 수 있다.

2.2 배전용 STATCOM의 실제동연계 운전결과

다음의 절에서는 배전용 STATCOM을 실제동에 연계한 후 수행한 전압플리커 저감 시험과 역률보상 시험의 결과를 자세히 설명한다. 먼저 2.2.1절에서는 전압플리커 저감기능에 대하여 유사한 부하조건에서 플리커 발생이 가장 심한 오후 14:30에서 16:30까지 2시간동안의 플리커 발생을 STATCOM을 투입하지 않았을 때와 투입하였을 때의 시험 결과를 보이며, 2.2.2절에서는 역시 유사부하에서의 역률보상 기능시험을 STATCOM이 없을 때와 STATCOM이 진·지상운전을 할 때 수행하고 그 결과를 보이고 있다.

2.2.1 STATCOM의 전압플리커 저감시험 결과

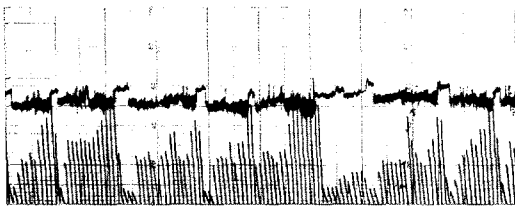


그림 7. STATCOM Off시 전압플리커 저감시험결과
Fig. 7 The result of tests for mitigation of voltage flicker without STATCOM

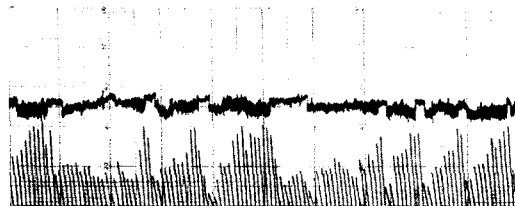


그림 8. STATCOM On시 전압플리커 저감시험 결과
Fig. 8 The result of tests for mitigation of voltage flicker with STATCOM

	$\Delta V_{10} \geq 0.45\%$ 인 전압플리커발생수
STATCOM Off	42
STATCOM On	4

표 1. 전압플리커 저감 시험 결과

Table 1. The result of tests for mitigation of voltage flicker without/with STATCOM

현재 국내에 적용되는 전압플리커 규제치는 ΔV_{10} 이 0.45%이하이며, 위의 표 1과 그림 7과 그림 8을 비교하여 보면 STATCOM이 전압플리커 저감에 큰 효과를 보임을 알 수 있다. 그림의 가운데의 초록색 파형은 전압

의 순간 변동치를 나타내며, 빨간색 파형은 플리커를 기록한 것이다.

2.2.2 STATCOM의 역률보상시험 결과

다음의 그림 9에서 그림 11까지의 시험 결과는 STATCOM의 장시간 연속 운전시의 안정성을 확인하고 무효전력 및 역률 보상효과를 보기 위해서 효성 공장에 STATCOM을 연결하고 역률보상 제어모드에서 일주일 단위로 운전하여 얻은 데이터이다. 본 논문에는 공장 부하의 특성을 잘 보기 위해서 각 운전모드에서의 목요일 데이터를 그림과 함께 설명한다. 그림 9은 STATCOM을 운전하지 않은 상태에서의 공장내 역률과 무효전력의 일일데이터이며, 그림에서 알 수 있듯이 역률은 0.6 ~ 0.8사이의 값을 가지며 무효전력은 200kVAR ~ 500kVAR까지 나타난다. 중간의 12시에서 14까지 무효전력이 작은 이유는 점심시간이기 때문에 전체적인 공장부하의 감소에 기인한 결과이다.

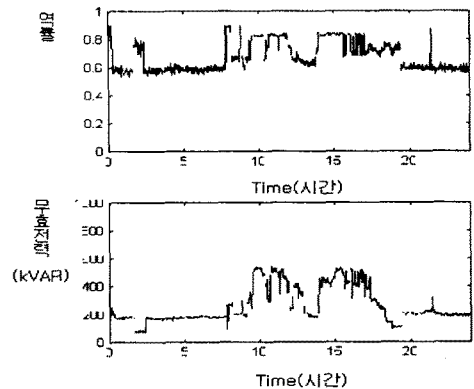


그림 9 STATCOM이 없을 때의 역률·무효전력의 일일데이터(99년 4월 22일, 목요일)

Fig. 9 Daily data of power factor and reactive power without STATCOM

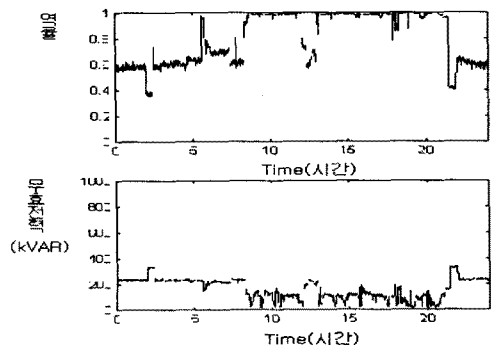


그림 10 STATCOM이 진상동작시 역률·무효전력의 일일데이터(99년 4월 29일, 목요일)

Fig. 10 Daily data of power factor and reactive power in capacitive mode with STATCOM

그림 10는 STATCOM을 진상동작 시킬 때의 공장의 역률과 무효전력의 일일 데이터이며, 역률은 0.6 ~ 1.0까지의 값을 가지며 무효전력은 100kVAR ~ 200kVAR의 값을 보인다. 시험결과 역률의 일일데이터에서 알 수 있듯이 공장이 가동중인 09시부터 21까지는 역률이 거의 1의 값을 유지하는 것을 볼 수 있다. 또한, 무효전력도 100kVAR로 크게 감소한 것을 알 수 있다. 그림 11에서는 이와 반대로 STATCOM을

지상운전 하였을 때의 시험 결과이며, 역률은 0.2 ~ 0.7까지

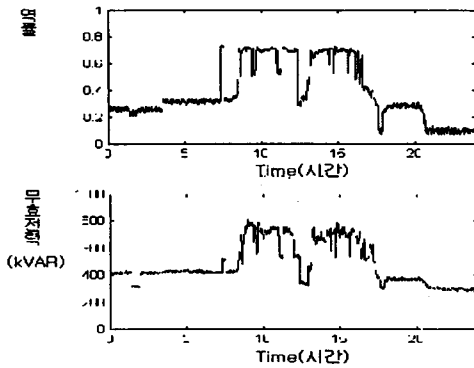


그림 11 STATCOM이 지상동작시 역률· 무효전력의
일일데이터(99년 5월 6일, 목요일)

Fig. 11 Daily data of power factor and reactive power
in inductive mode with STATCOM

지상운전 하였을 때의 시험 결과이며, 역률은 0.2 ~ 0.7까지로 낮아지며 무효전력 역시 400kVAR에서 800kVAR까지 늘어난다. 이는 실제 상황에서는 운전되지 않는 제어모드이지만 본 시험에서는 장시간 운전에서의 STATCOM의 성능과 안정성을 확인하기 위하여 본 시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 역률과 무효전력의 보상에서 STATCOM이 우수한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있었으며 또한 안정적으로 운전됨을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구는 배전계통에서의 전력품질 향상과 송전계통에서의 계통안정성 증대와 설비 이용률 극대화를 목적으로 하는 FACTS기기 중 하나인 배전용 STATCOM의 국내 제작기술 구축과 FACTS기기의 계통운용기술 확보를 목표로 수행하였으며, STATCOM이 가지는 전압플리커 저감기능, 무효전력 및 역률보상에 대하여 배전계통에 연계하여 실증시험을 수행하였으며, 본 논문에서 그 결과를 상세하게 설명하였다. 실증시험 결과 STATCOM이 전압플리커 저감과 역률보상 기능면에서 매우 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다. 향후 배전계통내 전력품질과 관련하여 핫이슈가 되고 있는 고조파 보상에 대한 성능 검증을 위한 실증시험을 수행할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Colin Schauder, Harshad Mehta, "Vector Analysis and Control of Advanced Static Var Compensators", IEEE Proceedings, Vol. 140, No.4, July 1993
- [2] Schauder, C. D., et al., "Development of a 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995
- [3] 이기선, 전영수, 오관일, "FACTS기기 개발 I단계 연구", 최종보고서, December 1999