

배전용 STATCON 설치사례 - 엔지니어링

한영성¹, 유일도¹, 최중윤¹, 홍순욱¹, 이학성¹, 전영수²
 (주)호성 중공업연구소¹, 한국전력공사 전력연구원²

**Field Demonstration of the Distribution STATCON
 - Engineering**

Y.S.Han¹, I.D.Yoo¹, J.Y.Choi¹, S.W.Hong¹, H.S.Lee¹, Y.S.Jeon²

Industrial R&D Institute of Hyosung Corporation¹, Korea Electric Power Research Institute²

Abstract - This paper describes the engineering process for analyzing the simulation result and deciding the site in which Distribution STATCON operates more effectively. For this purpose the modeling method of industrial loads, equipments and STATCON was represented. Models of motor, furnace and so on are presented for the modeling of industrial loads. The distribution system models include the parameters of the distribution line and transformer. The models of PEES(Power Electronics Subsystem), controllers and magnetics are consist of STATCON model.

1. 서 론

배전계통에서 발생하는 voltage flicker, voltage surge, voltage swell, 고조파 등의 전력의 품질을 저하시키는 현상들은 배전용 STATCON(Static Condenser)을 설치하므로써 발생횟수와 양을 줄일 수 있다. 당사에서 제작되어 시험 운전중인 STATCON의 경우 인버터 방식을 사용하여 이러한 전력품질을 저하시키는 요인을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 본 논문은 당사에서 제작된 STATCON의 설치에 관한 엔지니어링 과정의 일부를 기술한 것으로 이 기기가 보다 효과적으로 활용될 수 있는 장소 선정 및 설치 효과 분석 방법에 관해 서술한다.

2. 본 론

STATCON에서 무효전력을 공급하여 전압을 보상하는 경우 정상상태에서의 보상능력은 간단한 계산에 의해서 예측 가능하지만 flicker, surge, swell 등의 일종의 과도상태에서의 응답은 대상 플랜트와 STATCON의 E-MTDC 시뮬레이션을 통해서 예측 가능하다.

고조파 저감의 효과는 STATCON의 필터와 설치대상 플랜트의 부하, 보상용 콘덴서를 함께 고려한 주파수 특성을 조사할 필요가 있다. STATCON에서 보상을 위해 역위상의 고조파를 계통에 주입 할때 계통의 주파수 특성상 주입된 고조파가 30도 이상의 위상지연이 발생하는 경우 오히려 고조파를 증가시킬 수 있기 때문이다. 고조파 저감 효과에 관한 정량적인 관계는 EMTDC 시뮬레이션을 통해서 예측 가능하다. 현재 당사에서 제작된 STATCON은 당사 창원플랜트에 설치되어 시험가동 중이다. 따라서 본 논문에서는 엔지니어링의 예로서 당사 창원플랜트를 선정하였다.

2.1 창원 플랜트의 모델링 및 EMTDC 모델

호성 창원플랜트는 변전소로부터 약1km의 거리에 있다. 수전 전압은 22.9kV이고 부하용량은 약14MVA이

다. 그림 1은 창원플랜트의 시뮬레이션을 위해 사용된 단선도이다. 그림에서 보듯이 2개의 피더중 하나는 11MVA 변압기에 연결되어 있고 다른 하나는 3MVA의 변압기에 연결되어 있다. 11MVA 변압기는 주요생산 공장에 전력을 공급하는 변압기이다. 주요 부하로서는 소형의 교류 및 직류모터와 드라이브, 사무용 장비들이다. 3MVA 변압기는 1.5 MVA의 유도도와 소형의 산업용 부하와 연결되어 있다. 유도도는 CIS(current source inverter)로 구동된다. 원래 CSI는 계단파 모양의 전류를 흘리므로 큰고조파 발생원이된다. 역률 개선을 위해 인버터의 앞단에 콘덴서가 설치되어 있다. STATCON의 전압 보상과 고조파 저감기능을 확인하기 위해 3MVA 변압기의 앞단에 설치하기로 결정하였다(그림 1의 PCC점). 실측결과 선간 전압은 정격과 비교하여 약간 높아져 있다. STATCON의 설치전 엔지니어링 작업의 일부로서 시스템의 모델링을 위해 변전소와 공장 부하의 종류가 조사되어 졌고 몇 개의 점에서 전류와 전압을 실측하여 모델을 수정하는 과정을 수행하였다.

가)전동기 모델 : 전동기의 경우 제품 건조용 건조로의 히터 및 팬, 도장을 위한 펌프, 컴프레셔등에 사용되며 소용량의 전동기로 구성되어 있었다. 일반적인 전동기는 과도리액턴스와 정상 리액턴스를 이용하여 모델링하지만 전동기의 용량이 시스템 용량에 비하여 적은 경우, 과도리액턴스는 무시하고 모델링할 수 있다.

나)저주파, 중주파 유도도, 용접기모델 : 전류형 컨버터와 인버터로 구성된 저주파로는 주요한 고조파 발생원이다. 일반적으로 고조파 발생원의 경우 동일한 고조파를 발생시키는 전류원으로 모델링된다. 실측을 통해 얻어진 전류 파형을 주파수 분석하여 동일한 양의 기본파와 고조파가 흐르도록 전류원의 크기와 위상을 결정하여 구성하였다. 용접기나 중주파 유도도와 같은 다른 고조파 발생원도 같은 방법으로 모델링되었다.

다)변압기 모델 : 공장의 인입선 선로에 흐르는 고조파 전류는 그 하단에 존재하는 변압기의 결선에 의해 전류의 양이 영향을 받게 된다. 그림 1의 단선도에서 볼 수 있듯이 변압기(TR2)와 변압기(TR3)의 경우 결선의 차이가 있으므로 그 상단에 흐르는 고조파 전류에 영향을 주게 된다. 이와 같은 이유로 변압기(TR2) 하단의 변압기는 모두 저항과 인덕턴스로 모델링 되었지만 변압기(TR3)는 결선을 표현할 수 있는 실제적인 3상 변압기 모델을 사용하여 모델링 되었다.

라)선로모델 : 공장으로부터 전력을 공급하는 변전소(TR2)와 공장까지의 인입선 사이에는 1km가량의 ACSR선로가 연결되어 있으며 ACSR의 길이와 특성표에 따라 임피던스를 계산하여 모델링하였다. 인입선 이외의 선로는 공장내의 전력공급선도 같은 방식으로 모델링되었다.

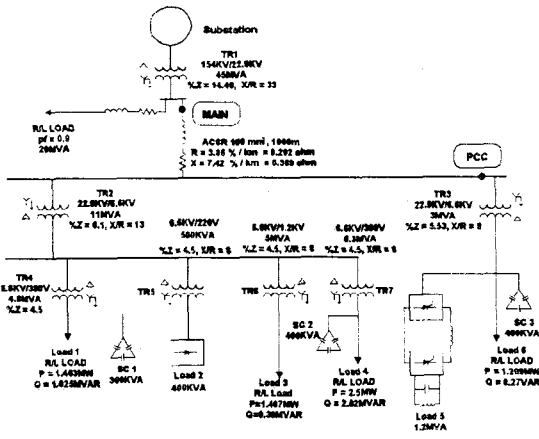


그림 1 창원 플랜트의 단선도

2.2 STATCON의 구성 및 EMTDC 모델

STATCON은 주요하게 3개의 부분으로 구성되어 있다. 전력전자부(PESS), IPT(InterPhase Transformer) 및 변압기(Magnetics), 제어 및 보호회로(Control). 모든 요소는 12m×2.6m의 컨테이너 안에 탑재되어 있다. 그림 2는 STATCON의 구성도이다

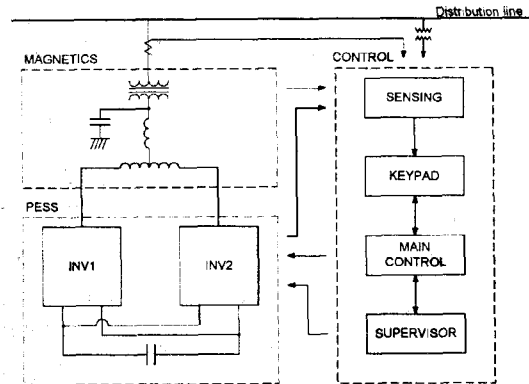


그림 2 STATCON의 구성

가) IGBT모듈, IPT, LC필터, 결합변압기 모델: 인버터 부분의 스위칭 소자와 IPT부분은 전압원으로 대체할 수 있고 이러한 전압원은 LC필터와 결합변압기를 통해 계통과 연결된다.

나) DC링크단 모델: DC링크단은 전류원이 콘덴서와 저항으로 직렬연결되어 있는 형태로 모델링되고 저항성분은 STATCON의 손실에 해당되는 부분으로 이에 의하여 DC전압의 변동을 고려하였다.

다) 제어기 모델: 제어기는 고조파 전류제어, 전압제어, DC링크 전압제어 부분으로 구분될 수 있으며 특성에 따라 이에 해당하는 제어블록을 구성하였다.

- 고조파 전류제어: 부하측의 전류를 측정하여 각각 5, 7차에 관하여 d,q변환을 한다. 그 이상의 고조파는 실제 계통에서 크게 발생하지 않으므로 전류제어에서 제외하였다. 그 결과 해당차수의 전류는 d,q축에서 상수값을 갖고 그외 차수는 주기를 가지고 변화하는 값을 갖게 되는데 이 값을 적분할 경우 해당차수의 상

수값을 얻을 수 있다. 이 값은 역d,q변환과 PI제어기를 거쳐 d,q전류의 기준값을 계산하는데 이용된다.

- 전압 제어 알고리즘: STATCON 설치점의 전압은 STATCON에서 공급하거나 흡수하는 무효전력의 양을 제어하므로서 이루어지므로 기준 전압과 설치점 전압간의 차이를 PI제어기의 입력으로 사용하고 PI제어기의 출력값은 q축 기준 전류를 계산하는데 사용한다.

- DC링크단 전압제어: 기준전압과 콘덴서 양단전압의 차를 PI제어기의 입력으로 사용하고 PI제어기의 출력값은 d축 기준 전류를 계산하는데 사용한다. 그림 3는 STATCON의 제어기의 구성을 나타낸 블록선도이다.

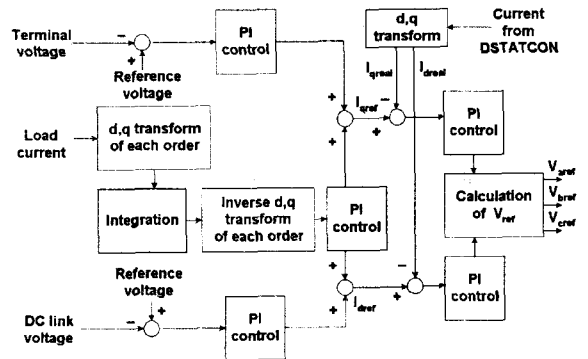


그림 3. STATCON의 제어기 구성도

2.3 정상 상태의 전압 보상

정상상태에서 STATCON의 무효전력 공급에 따른 전압의 변화는 실용상 허용될 수 있는 몇가지 가정과 그 가정을 통해 유도된 수식을 통해 조사될 수 있다.

$$\Delta V \approx -(X \Delta Q + R \Delta P) \quad (1)$$

가정: V_S (송전단 전압) $\approx V_R$ (수전단 전압) $\approx 1(\text{pu})$

Q, P 가 단락용량에 비해 크지 않을 경우

정의: ΔV : 송전단과 수전단의 전압차 (pu)

$R + jX$: 선로와 변압기의 임피던스 (pu)

ΔQ : 무효전력의 변화량 (pu)

ΔP : 유효전력의 변화량 (pu)

창원플랜트의 경우

$$R + jX = (\text{창원플랜트에 전력을 공급하는 변전소 변압기의 임피던스} + \text{STATCON 이 설치된 지점까지의 선로 임피던스})$$

여기서 STATCON은 무효전력만을 변화시키므로

$$\Delta V / \Delta Q \approx -X \text{ (pu)} \quad (2)$$

위의 식 2의 결과는 STATCON의 무효전력 공급에 의한 전압의 변화는 pu로 표시되었을 경우 리액턴스에 비례한다는 것을 나타내고 있다. 위의 결과를 창원 플랜트에 적용할 경우 (STATCON설치 지점은 그림 1의 PCC점) $\Delta V / \Delta Q = 90.77 \text{ V} / \text{MVA}$ 로서 이를 그림으로 나타낸 것이 그림 4이다. 이것의 의미는 STATCON이 유도성 1MVA에서 용량성 1MVA로 변화할 때 0.0076pu의 전압이 변화함을 의미한다.

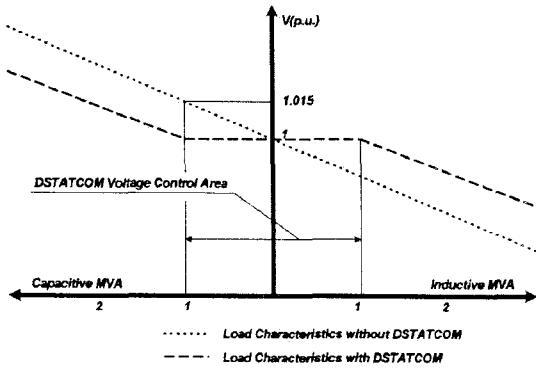


그림 4 효성 창원플랜트의 전압/무효전력 곡선

2.4 STATCON설치에 따른 주파수 특성변화

그림 5는 STATCON의 설치전의 고조파 특성이다. 이것은 플랜트의 부하와 설치된 보상콘덴서를 고려하여 3MVA선로에 전류 임펄스를 가하고 계통으로 흘러나가는 전류를 관찰한 것이다. 그림 6은 STATCON을 설치한 상태의 고조파 특성을 나타내고 있다. STATCON자체는 특성을 변화시키지 않으나 필터용 콘덴서(200kVA)에 의해서 약간 변화한다. STATCON의 설치전 주파수 특성은 약 240Hz 이하의 주파수가 확대되는 경향을 보이는데 이 대역에서 기본파를 제외한 그 외의 주파수는 거의 존재하지 않으므로 문제되지 않는다. STATCON설치 후에는 500Hz~750Hz의 대역의 주파수가 확대되는 경향을 보이는데 일반적으로 540Hz(9th)는 계통에서 매우작아서 고려대상에서 제외되고 660Hz(11th)만 고려하면 된다. 그림 6에 존재하는 730Hz의 공진점이 존재하는데 이 대역의 고조파의 크기는 거의 존재하지 않으므로 크게 문제되지 않는다.

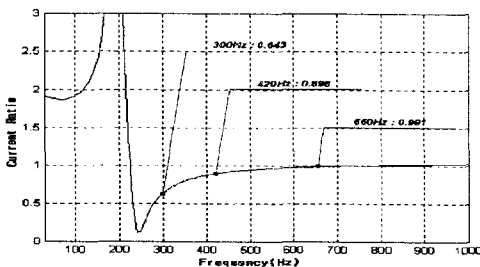


그림 5 STATCON의 설치전 주파수 특성

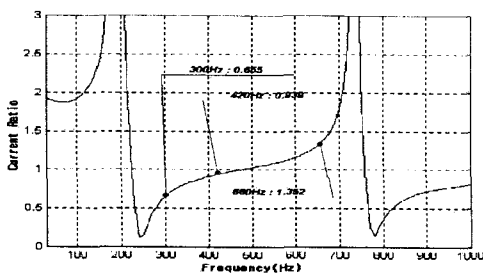


그림 6 STATCON의 설치후 주파수 특성

2.5 시뮬레이션 결과

표 1은 STATCON 설치전후의 설치점의 전압, 전류의 시뮬레이션 결과를 정리한 표이다. STATCON의 용량이 계통의 단락용량과 부하용량에 비하여 작아서 효과가 확실하게 나타나지는 않지만 설치전 1.0184(pu)의 전압이 1.0145(pu)로 낮아지므로서 STATCON이 용량의 최대허용 범위에서 전압을 기준전압에 맞추기 위해 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 참고로 설치전의 전압을 기준전압만큼 감소시키기 위하여 4.8MVA의 무효전력이 필요하며 현재의 STATCON용량으로는 완전한 제어가 불가능하다. 22.9KV선로의 전압THD는 0.57%에서 0.43%로 25%정도 개선되었고 전류THD는 2.7%에서 1.24%로 55%정도 개선효과가 크게 나타났다. 고조파제어를 5차와 7차만을 제어함을 고려할 경우 제어효과가 크게 나타났음을 알 수 있다.

표 1 시뮬레이션 결과

설치유무		설치전	설치후
전압 (V)	1차	23322	23232
	(pu)	(1.0184)	(1.0145)
	5차	71.34	9.35
	7차	90.15	24.49
전압의 THD	11차	68.34	95.71
		0.57	0.43
	1차	209.39	220.75
	5차	3.97	0.51
전류 (A)	7차	3.63	0.90
	11차	1.69	2.41
	전류의 THD	2.7	1.24
	STATCON-용량 (kVA)	--	1030.8

3. 결 론

본 논문에서는 STATCON 설치에 필요한 엔지니어링 과정에 관해 서술하였다. 전압보상의 경우 간단한 계산에 의해 STATCON의 용량에 따른 전압보상정도를 계산할 수 있으므로 변압기와 선로의 임피던스, 플랜트의 부하의 양을 알 경우 전압강하 정도와 STATCON의 용량에 따른 보상정도를 계산할 수 있으므로 STATCON의 용량을 결정할 수 있고 flicker, surge, swell등의 감쇠효과는 EMTDC 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있다. 또한 고조파 저감 효과 고려시 STATCON 설치에 따른 계통 공진점의 변화를 고려하여야 하며 저감된량은 EMTDC 시뮬레이션을 통해 예측할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Colin Schauder, Harshad Mehta, "Vector Analysis Control of Advanced Static Var Compensators", Proceedings, Vol. 140, No.4, July 1993
- [2] Juan A. Martinez-Velasco, Computer Analysis of Power System Transients, IEEE, 1997
- [3] "1MVA IGBT형 STATCON개발", 효성중공업 기술연구소 기술 보고서, 1997
- [4] C. Edwards, N. Abi-Samra, N.Woodley, G.Arma Clouston, W.Malcolm, A. Sundaram, "Static Compe for Distribution Systems", Power Quality/Power Proceedings, April 1997

본 논문은 한국전력공사 전력연구원의 "FACTS기기 개발 1단계 연구"의 일환으로 이루어진 결과임