

발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC 개발에 관한 연구

논 문
60-11-18

A Study on Development of SVC to Improve Harmonics and Power Factor of Power Plant

윤 광 희* · 이 희 진†
(Yun, Gwang Hee · Heejin Lee)

Abstract - The power system has to maintain its synchronism from transient disturbances and oscillations. To achieve this, the static var compensator(SVC), which is a flexible AC transmission system(FACTS), is applied to the power system. SVC using an advanced control algorithm improves the stability of power system. This paper is a study on design of SVC to improve harmonics and power factor of power plant. The proposed SVC analyzes harmonics, voltage drop and reactive power in real time. On the basis of the analysis of the data, the SVC using a switching control algorithm decreases harmonic signals and increases the power factor. The experimental results show that the proposed SVC enhances the stability of power system.

Key Words : SCV, Switching controller, Power factor, Total harmonics distortion

1. 서 론

화력발전소의 경우 석탄 등의 연료가 연소된 후 발생하는 미세 분진이 연돌을 통하여 대기로 방출되기 전에 분진을 제거하는 전기집진기의 사용이 반드시 필요하다. 따라서 발전 설비에서 전기 집진기는 매우 중요한 설비로서 안정성이 높아야 한다. 그러나 직류 고전압의 발생으로 고조파 및 순간 전압강하가 발생하여 전기집진기의 성능에 영향을 미치게 되며 발전기의 정비를 위해 용접기 등의 전원을 사용하게 되면 전압의 플리커(flicker) 현상 및 순간 전압강하 등으로 전력상태가 불안정해 질 수 있고 발전소의 보호계전기가 동작할 수 있기 때문에 발전소의 안정적인 사용을 위해 전기집진기의 고조파 및 전압강하를 개선하는 설비를 제어하여 실시간으로 집진기 설비의 전력 상태를 제어할 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

전력 계통의 과도현상을 해결하기 위해 일반적으로 발전기의 회전자 동요를 억제하고 안정도 향상을 위한 전력 계통 안정화 장치(PSS, Power System Stabilizer)가 주로 사용된다. 그러나 장거리 전력 전송의 경우 발전기에 설치된 안정화 장치(PSS)의 기능만으로 뛰어난 안정화 특성을 기대할 수 없다. 이러한 경우 유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission System) 기기의 하나인 정지형 무효 전력 보상기(SVC, Static Var Compensator)를 설치하여 시스템

의 안정화 성능을 향상시킬 수 있다. 정지형 무효전력 보상기(SVC)는 기존의 전압제어 및 무효전력 보상기들이 가지고 있는 비속응성과 불연속성 문제를 해결해 줄 수 있으며, 부하에 응동하여 연속적으로 무효 전력을 보상함으로써 효과적인 전압 제어 특성을 나타낸다.

전기집진기는 대기오염 등 발전소 전체 시스템의 중요한 부분에 해당 하는 특성을 가지고 있어 안정적 운영을 위한 고조파 및 전압강하 개선용 역률 보상장치는 국산 제품이 있다고 하여도, 발전소에서는 대부분의 제품을 수입해서 쓰는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 발전소 전기집진기의 고조파 및 전압강하를 개선하기 위해 발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC를 연구하였다. 제안하는 개선용 SVC 개발은 고조파의 발생으로 인한 변압기의 진동과 집진설비의 효율 저하, 계통의 계전기 동작 등에 의한 발전소의 운전정지 및 대기오염 발생 가능성 등을 낮출 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장에서는 연구의 배경과 필요성 및 연구내용으로 구성하였고 제 2장에서는 SVC의 기본 구조와 기능, 고조파 이론 및 역률에 대해 기술하였다. 제 3장에서는 제안된 SVC용 제어기, 스위칭 제어 알고리즘, 집전용 스위칭 회로 및 수동 필터 기능을 갖는 SVC 설계에 대해 설명하였고, 제 4장에서는 제안하는 SVC 설치 시 각 상의 주요차수별 전압 고조파와 전류 고조파, 역률 개선 변화를 분석하였으며, 제 5장은 본 논문의 결론과 추가적으로 연구해야할 방향을 제시하였다.

* 정 회 원 : (주)파워닉스, 연세대학교 공학대학원 전기전자 전공 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 한경대학교 정보제어공학과 교수, IT 융합연구소

E-mail : lhjin@hknu.ac.kr

접수일자 : 2011년 7월 28일

최종완료 : 2011년 9월 21일

2. 전력 계통 모델링

2.1 정지형 무효전력 보상장치(SVC)

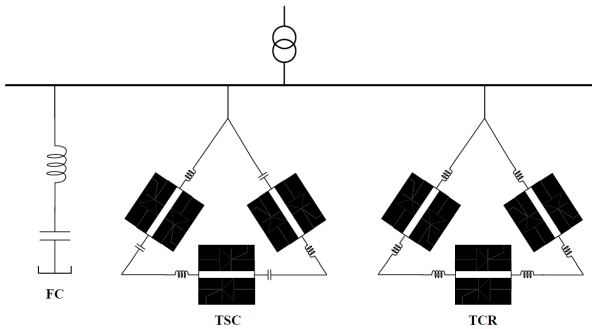
대용량 반도체 스위칭 소자를 이용한 정지형 무효전력보

상장치(SVC)란 대형 전력망에 설치되어 전기품질과 효율을 높은 수준에서 균일하게 유지시키며, 전체 무효전력량을 연속적으로 제어하는 전력장치중 하나이다. SVC는 선로 사고시 응답 속도가 빠르기 때문에 고속 정밀한 전압 및 무효전력 제어가 가능하고, 유지비용과 손실이 적으며 보수가 용이한 장점이 있다[10].

SVC의 기본 원리는 사이리스터(thyristor)를 이용하여 병렬 콘덴서와 리액터(reactor)를 신속하게 접속함으로써 무효 전력 및 전압을 제어하는 것이다. SVC는 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스(susceptance)를 변화시킴으로써 모선 전압을 빠르고 연속적으로 제어하며 부가적으로 과도 안정도 향상, 전력 동요 억제, 저주파 진동 억제 등의 다양한 제어도 가능하다. 따라서 그 목적상 주로 부하측 모선에 설치되어 운전되어지며, 기존의 전압제어 기기들과 상호작용이 이루어진다.

2.1.1 SVC의 기본 구조

SVC는 전력계통에 병렬로 연결되어 무효전력을 흡수 또는 공급함으로써, 전압을 일정하게 유지하거나 원하는 제어 동작을 수행하는 장치이다. 기존의 진상 무효전력 보상장치인 전력용 콘덴서(shunt capacitor)와 지상 무효전력 보상장치인 병렬 리액터(shunt reactor)등과는 달리, SVC는 연속적인 제어를 수행함으로써, 동기조상기와 비슷한 제어 특성을 갖게 된다. SVC의 기본 구조는 그림 1과 같다[3][11].



FC : Fixed Capacitor, TSC : Thyristor Switched Capacitor, TCR : Thyristor Controlled Reactor

그림 1 SVC의 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of SVC

2.1.2 SVC의 V-I 특성 및 모델

SVC의 전압 변동에 따른 V-I 특성은 그림 2와 같다. SVC가 연결된 모선의 전압이 V_0 로 운전되고 있을 때 계통의 운전점 변화로 ΔV_0 만큼 전압이 증가되었다면 SVC는 모선 전압이 높음을 감지하고 지상 전류 I_1 을 흐르게 하여 모선전압을 V_1 으로 이동시킨다. 이는 식 (1)과 같이 표현된다 [5].

$$V_1 = (V_0 + \Delta V_0) - Z \cdot I_1 \tag{1}$$

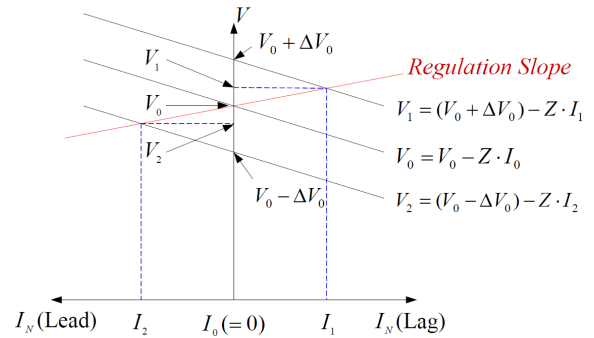


그림 2 SVC의 V-I 특성
Fig. 2 V-I Characteristic of SVC

같은 방법으로 계통 전압이 ΔV_0 만큼 감소하면, SVC는 진상 전류 I_2 을 흐르게 하여 단자 전압을 V_2 로 복구하게 된다. 그러므로 SVC의 V-I 특성 기울기인 Regulation Slope가 적으면 SVC에 흐르는 전류 변화를 더 증가시켜 더 큰 전압을 보상하여 전압 변동이 적게 된다.

SVC가 설치된 모선전압을 입력으로 사용하는 SVC의 동적 모델은 그림 3과 같다.

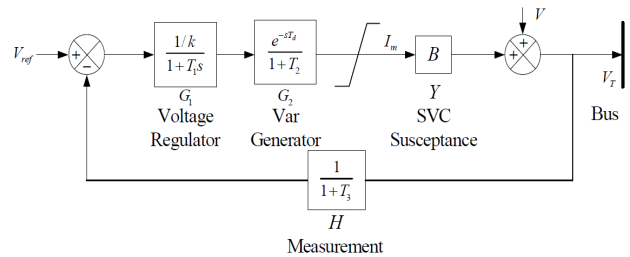


그림 3 SVC의 전달 함수 블록 다이어그램
Fig. 3 Transfer function block diagram of SVC

SVC의 운전 영역에서 단자 전압 V_T 에 대한 입력 전압 V 와 기준 전압 V_{Ref} 의 관계는 식 (2)와 같다.

$$V_T = V \frac{1}{1 + G_1 G_2 H Y} + V_{Ref} \frac{G_1 G_2 Y}{1 + G_1 G_2 H Y} \tag{2}$$

SVC는 변화하는 단자 전압 제어가 목적함수이므로, $V_{Ref} = 0$ 으로 설정하고 미소 변동에 대해서만 고려한다. 계통 전압의 변화 ΔV 에 대한 단자 전압의 변화 ΔV_T 는 식 (3)과 같다.

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + G_1 G_2 H Y} = \frac{1}{1 + G H Y} \tag{3}$$

그림 3에서 T_1 는 PI 제어기의 시정수(일반적으로 약 10~50[ms]의 무효 전력의 전달 지연), T_2 는 TCR(Thyristor Controlled Reactor) 또는 TSC(Thyristor Switched

Capacitor)의 시정수, T_3 는 측정회로의 시정수(약 8~16[ms]), T_d 는 무효전력의 전달 지연(TCR: 약 2.5[ms], TSC: 약 5.0[ms]), $Y=I_m Z$ (시스템 어드미턴스), k 는 식 (4)에 의해 주어지는 조절경사(Regulation Slope: 1~5[%]), s 는 라플라스 연산자이다.

$$k = \frac{\Delta V_{C_{max}}}{I_{C_{max}}} = \frac{\Delta V_{L_{max}}}{I_{L_{max}}} \quad (4)$$

정상상태에서 $s \rightarrow 0$ 이고, 식 (3)은 $T2 \ll 1, T3 \ll 1$ 이므로 다음과 같이 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta V_T}{\Delta V} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{k}} \quad (5)$$

식 (5)로부터 Regulation Slope가 작아지면($k \rightarrow 0$) 단자 전압은 시스템 전압($(\Delta V_T / \Delta V_{SVC} \rightarrow 0)$)이 변하더라도 일정하다. 이와 반대로 Regulation Slope가 증가($k \gg Y$)하면 단자 전압은 제어되지 않는다. ($\Delta V_T / \Delta V_{SVC} \rightarrow 1$)

2.2 고조파 이론

2.2.1 고조파의 정의 및 푸리에(Fourier) 급수

전력 계통의 정현파 전압이 비선형 부하에 인가되면 비정현파의 부하전류가 계통에 유입되어 전원임피던스에 의해 전압 강하를 발생하게 되고, 이 전압 강하에 의해 정현파 전압은 왜곡된 파형이 된다.

왜곡파의 질을 나타내는 고조파 지수로는 고조파 종합 왜형율과 고조파 함유율로 나타낼 수 있다. 고조파 종합 전압과 전류의 왜형율(THD, Total Harmonic Distortion)은 식 (6)과 같이 기본파 성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로 나타 낼 수 있다. 여기서 V_n 과 I_n 은 제 n 차 고조파 전압, 전류의 실효치를 의미하고 V_1 과 I_1 은 기본파 전압, 전류의 실효치를 의미한다[1][2][8].

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum V_n^2}}{V_1} \times 100[\%], n \geq 2$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum I_n^2}}{I_1} \times 100[\%], n \geq 2 \quad (6)$$

고조파 함유율(DF, Distortion Factor)은 식 (7)과 같이 어떤 차수의 고조파 성분 실효치와 기본파 성분 실효치에 대한 비율로 나타낼 수 있다.

$$V_{DF} = \frac{V_n}{V_1} \times 100[\%], n \geq 2$$

$$I_{DF} = \frac{I_n}{I_1} \times 100[\%], n \geq 2 \quad (7)$$

2.2.2 고조파 관리 기준

고조파, 전압 불평형, 플리커 장애를 발생시키거나, 발생시킬 우려가 있는 부하에 대하여, 전력을 공급하는 경우 이

러한 장애를 방지할 수 있는 조정 장치나 보호장치의 시설을 요구할 수 있는 제도적인 장치가 마련되어 있다. 이러한 제도는 다른 다수의 수용가에 전력 공급 책임을 지고 있는 전력회사로서 어느 특정 수용가의 전력 공급으로 인하여 여러 수용가가 피해를 입지 않도록 관리하기 위함이다.

전력 품질 저하를 규제할 수 있는 근거는 전기 공급 약관이다. 이 약관은 전기사업법 제 16조(전기의 공급 약관)에 의거 전기의 공급자인 일반 전기사업자(한국전력 공사)와 전기의 사용자인 고객, 즉 전기 사용 양자의 전기 사용에 관한 권리 의무 관계를 정하고 있는 부합 계약이다.

고조파에 대한 허용 기준으로는 고조파 허용 잠정 기준을 근거로 작성된 한국 전력공사의 영업처리 기준이 있다. 고조파에 대한관리를 위해 한국전력공사에서는 영업업무 처리 지침을 작성 시행하고 있으며 세부 내용은 표 1과 같다[7].

표 2는 IEEE std. 519에서는 전압 레벨에 따른 고조파 제한치를 제시하고 있다[9].

표 1 고조파 허용 기준

Table 1 Harmonic allowance standards

계통	지중선로가 있는 S/S에서 공급하는 수용가		가공선로만 있는 S/S에서 공급하는 수용가	
	전압 왜형율[%]	등가방해 전류 [A]	전압 왜형율[%]	등가방해 전류 [A]
66kV 이하	3	-	3	-
154kV 이상	1.5	3.8	1.5	-

표 2 IEEE std. 519 고조파 허용 기준

Table 2 IEEE std. 519 Harmonic allowance standards

PCC에서의 전압 (V_n)	각 고조파의 전압 왜형율[%]	총 전압 왜형율 VTHD[%]
$V_n \leq 69[kV]$	3.0	5.0
$69[kV] \leq V_n \leq 161[kV]$	1.5	2.5
$V_n \leq 161[kV]$	1.0	1.5

2.3 역률

역률이란 피상전력에 대한 유효전력의 비율로서 전체 전력 중 실제로 일하는 전력의 비를 나타내며 식 (8)과 같이 구해진다. 역률은 보통 코일성분이 많은 기기일수록 낮게 나타난다[6].

$$\text{역률} = \frac{\text{유효전력}}{\sqrt{(\text{유효전력})^2 + (\text{무효전력})^2}} \times 100[\%]$$

$$= \frac{\text{유효전력}}{\text{피상전력}} \times 100[\%] \quad (8)$$

3. 발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC 개발

본 논문에서는 SVC의 기본 원리인 무효전력과 전압을 제어하기 위하여 스위칭 제어 시스템과 알고리즘을 제안하며, 이를 통하여 역률을 개선하고 고조파 성분을 감소시키게 된다. 고조파 성분은 수동 필터만으로도 개선이 가능하나 수동필터의 스텝별 운전과 개방 시의 공진 등의 문제점과 운전 시 순간 고조파 부하의 대응에 대한 민첩성과 안정성을 위하여 사이리스터의 실시간 스텝별 제어가 가능하도록 스위칭 제어 시스템과 제어 알고리즘을 제안하였다.

본 논문이 제안하는 발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC의 기술은 그림 4와 같다. 지능제어 및 전력전자 소자 제어를 통한 전기집진기의 전력효율의 증가와 고조파 개선 및 역률 개선으로 소내전력 절감 및 설비 트러블 안정화를 위한 것이다. 제안하는 SVC의 무효 전력 보상 시스템은 점점용 스위칭 회로와 수동필터 기능을 갖는 L-C, 제어기 부분과 주제어기로 구성된다.[4]

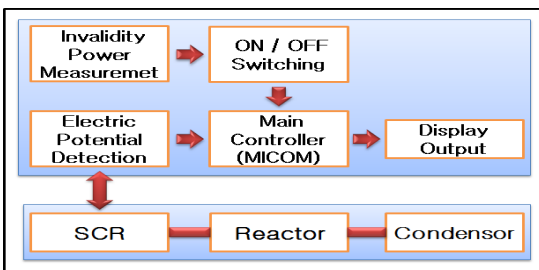
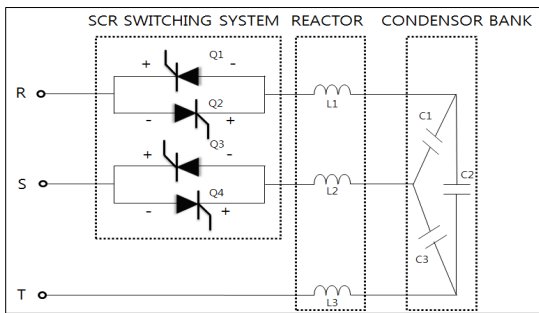


그림 4 개선된 SVC 기술
Fig. 4 Core technology of improved SVC

3.1 무효 전력 보상 시스템

종래에는 SVC가 제로크로싱 온/오프(on/off) 비율이 고정되어 있는 방식을 사용하거나 비율의 변화가 제한되어 있는 가변 방식을 사용함으로써 전력효율을 극대화시키기 어려운 문제점이 발생되었다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해소하기 위한 무효전력 보상 시스템을 제안하고자 한다. 제안하는 전자식 무효 전력 보상 시스템은 주제어기로부터 점점 온/오프 신호를 입력받아 스위칭 제어 알고리즘에 따라 점점을 온/오프시키게 된다.

그림 5는 제안하는 무효전력 보상 시스템의 스위칭 제어 시스템 블록 다이어그램이다. 신호 검출부에서 전원 전압과 전원 전류의 신호가 검출되면 A/D 변환부에서 이를 변환하

고 계산부에서의 연산에 따라 제어 및 구동이 이루어진다.

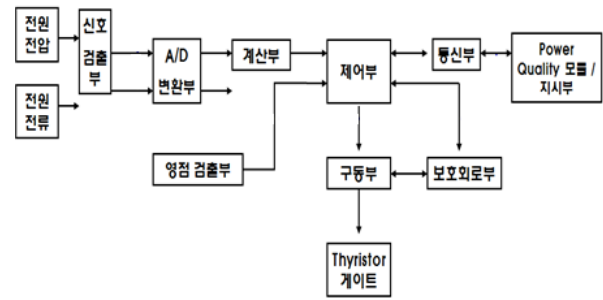


그림 5 스위칭 제어 시스템 블록도
Fig. 5 Switching control system block diagram

3.1.1 주 제어기

무효 전력 보상 시스템의 주제어기는 그림 6과 같이 구성되며 본 논문에서는 ABB사의 제품을 사용하였다. 주제어기는 입력되는 부하의 제어량을 실시간으로 측정 한 후 제어 알고리즘을 이용하여 스위칭 제어기의 제로크로싱 온/오프 비율을 실시간으로 조정한다. 즉, 전자식 무효 전력보상 시스템의 주제어기는 최적의 제로크로싱 온/오프 비율을 제공하고 이를 통해 에너지 효율을 극대화하도록 한다.

삼상 또는 단상 AC 전원의 전압위상을 측정하고 주제어기에 DC 전원을 공급하는 AC/DC 변환부, 전압 위상과 전류 위상을 정격 DC 전압 변위 안에서 측정하기 위하여 아날로그 신호로 변환시키는 PT/CT 측정 변환부, 무효전력량과 조작 메뉴 등을 표시하기 위한 LCD, PT/CT 변화량을 실시간으로 측정하고 제어 알고리즘을 이용하여 12개의 스위칭 제어기에 제어 입력량에 따라 스위칭 온/오프를 제어하는 CPU, 주제어기의 수동/자동과 정지/동작 등의 모드 설정을 조작하기 위한 조작용 버튼부, 스위칭 제어기의 동작 이상 유무를 감시하기 위한 스위칭 제어기 이상 감지부, 스위칭 제어기에 제어 신호를 제공하는 스위칭 제어기 점점부로 구성된다.

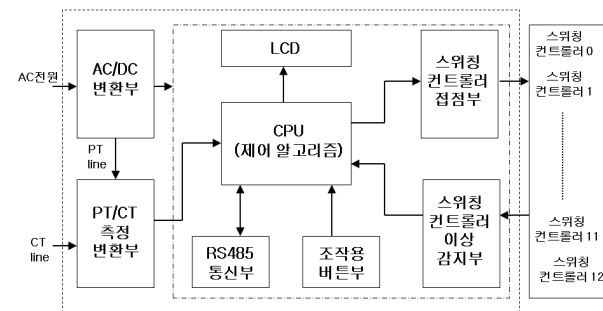


그림 6 주 제어기 블록도
Fig. 6 Main controller block diagram

3.1.2 점점용 스위칭 제어기

무효 전력 보상 시스템의 점점용 스위칭 제어기는 그림 6-7과 같이 구성되며 마이크로컨트롤러(MCU)는 마이크로

칩사의 PIC18F6520을 사용하였다.

주제어기에서 인가된 SCR 접점 온 시작 신호를 인식한 후 최적 위상 감지부 출력신호를 입력받아 스위칭 온 제어 알고리즘에 따라 각 상의 양쪽방향 SCR에 온 동작신호를 인가시키며 주제어기로부터 SCR 접점 오프 시작 신호를 인식하여 스위칭 오프 제어 알고리즘에 따라 SCR 오프 시점과 순번을 입력받아 SCR를 오프시키는 MCU, S상/T상과 콘덴서 뱅크의 전압차의 위상신호 발생 및 삼상의 위상 변화를 실시간 감시하여 신호를 발생하는 최적 위상 감지부, CT로부터의 전류변화를 전압으로 변환시키는 CT 전류전압 변환부, 콘덴서 뱅크 온/오프에 따른 돌입전류와 서지전원을 제거하기 위한 스너버 회로부, 주제어기와의 데이터 송수신

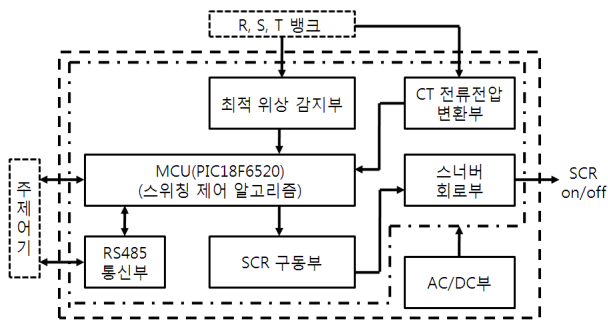


그림 7 스위칭 제어기 블록도
Fig. 7 Switching controller block diagram

을 위한 RS485 통신부, SCR을 온/오프시키는 회로로 구성된 SCR 구동부, SCR을 동작시키기 위한 스위칭 제어기에 DC 전원을 공급하는 AC/DC부로 이루어져 있다.

그림 7의 스위칭 제어기를 동작시키는 스위칭 제어 알고리즘은 그림 8과 같이 SCR 온 동작은, 스위칭 제어기의 CPU가 대기상태에서 주제어기로부터의 SCR 접점 온 시작 신호를 인식하게 되면 CPU는 최적 위상 감지부를 실시간 감시하여 S상/T상과 콘덴서 뱅크와의 전압차의 위상 변화를 이용하여 S상과 T상에 대한 신호를 순서대로 출력하는 최적 위상 감지부의 신호를 인식하여 각 상의 SCR에 온 신호를 순서대로 인가하면 SCR 구동부에 의하여 한쪽 SCR이 온 되고 다음 반주기에서 반대쪽 SCR이 온되게 된다.

SCR 오프 동작은, 주제어기로부터 SCR 접점 오프 시작 신호가 입력되기 전까지, CPU는 최적 위상 감지부의 전압 위상과 CT 전류전압 변환부로부터 입력된 전류 값과 위상 값 데이터를 받아서 구성되어 있는 SCR 스위칭 오프 제어 알고리즘의 데이터베이스 값을 변경하고 이를 이용하여 스위칭 오프 제어 입력 값을 개선하고 SCR 스위칭 오프 제어 알고리즘을 재구성한다. 주제어기로부터 SCR 접점 오프 시작 신호가 인가되면, CPU는 SCR 스위칭 오프 제어 알고리즘을 이용하여 S상과 T상의 SCR을 오프시키는 순서에 따라 최적의 시점에서 각 상의 SCR을 오프시키는 신호를 SCR 구동부에 출력시키고 최적 위상 감지부를 통해 S상과 T상의 SCR이 오프 되어 있는지 확인하여 주제어기에 SCR 오프 완료 신호를 전송한다.[5]

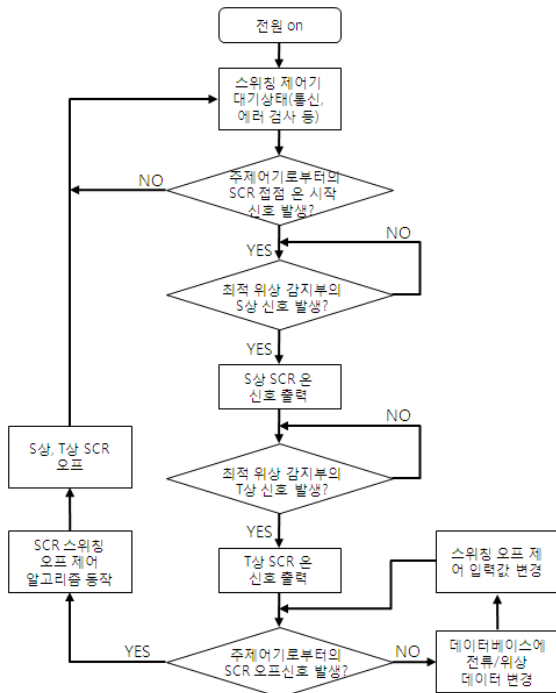


그림 8 스위칭 제어 알고리즘
Fig. 8 Switching control algorithm

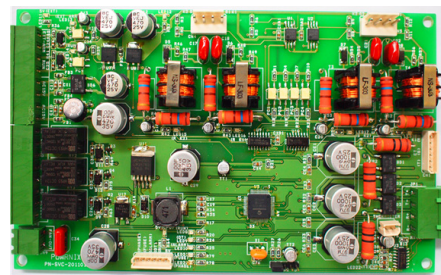


그림 9 SVC 스위칭 제어 보드
Fig. 9 SVC switching control board



그림 10 SVC 스위칭 제어 시스템
Fig. 10 SVC switching control system

제안하는 전자식 무효 전력 보상 시스템은 주제어기와 더불어 집적용 스위칭 제어기를 통해 무효전력량을 최소화하여 에너지 효율을 극대화하게 된다. 그림 9는 개발된 SVC 스위칭 제어 보드이며 그림 10은 현장에 설치된 SVC 스위칭 제어 시스템이다.

3.2 수동필터 기능을 갖는 SVC 설계

본 논문에서 제안하는 발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC는 다음과 같은 장점이 있다. 첫째로 최적화 설계로 기존의 SVC에 비해 크기 및 구성 배치의 소형화와 경량화를 구현하였다. 기존의 SVC와는 달리 모듈화 타입으로 전선 등의 사용량을 절감하여 온도를 현저하게 낮추었고 설치 시 기존 수입 SVC의 70[%] 공간만이 필요하다. 또한 모듈화를 통해 SVC의 유지보수 시에도 다른 스텝의 운전이 가능하고 보호회로용 고속 퓨즈를 일체형으로 내장하여 유지보수가 쉽다. 두 번째는 동작 속도 및 안정성을 확보하였다. 16[ms] 이하의 동작으로 부하변동에 따른 실시간 대응이 가능하고 LCD의 설치로 보호회로 설정이 개별적으로 가능하다.

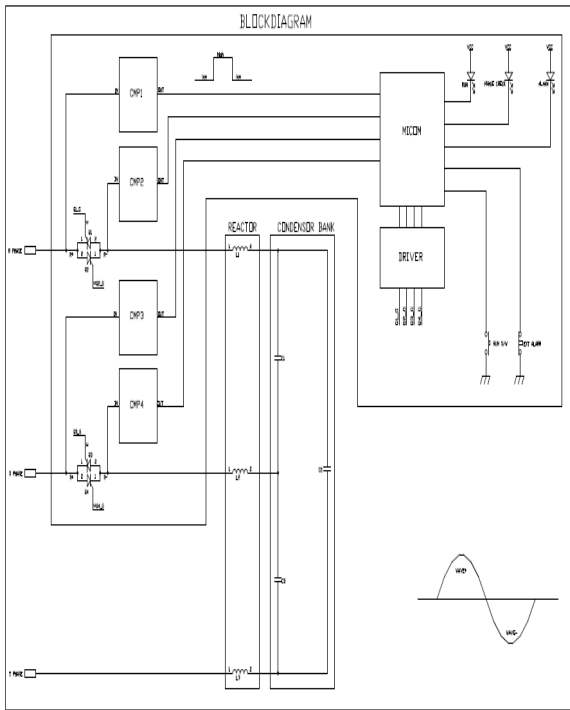


그림 11 SVC 스위칭 제어 시스템 블록도
Fig. 11 SVC switching control system block diagram

또한 알람 동작시 내부 메모리에 저장하도록 하였다. 내부 상별 검출용 CT 설치로 저전류 및 고전류, 상 밸런스 측정과 CPU 제어 시 전류 및 온도 상승으로 인한 자동 정지 및 복귀 기능이 내장되어 있다. 세 번째는 3상 전원의 R, S, T 상별 위상과 상관없이 SCR을 동작시키면, 전위차에 의해 돌입 전류가 증가하여 노이즈가 발생할 수 있으므로 SVC는 R상과 S상의 양단 전위차가 같을 때, SCR을 제어함으로써, 돌입 전류의 발생을 방지하여 노이즈를 감소시킬 수 있다.

그림 11은 제안된 개선용 SVC의 스위칭 제어 시스템 블록도이고 그림 12는 SVC의 외형도이다. 실제 제작된 SVC는 그림 13과 같고 250KVAR 급 사양은 표 3과 같다.

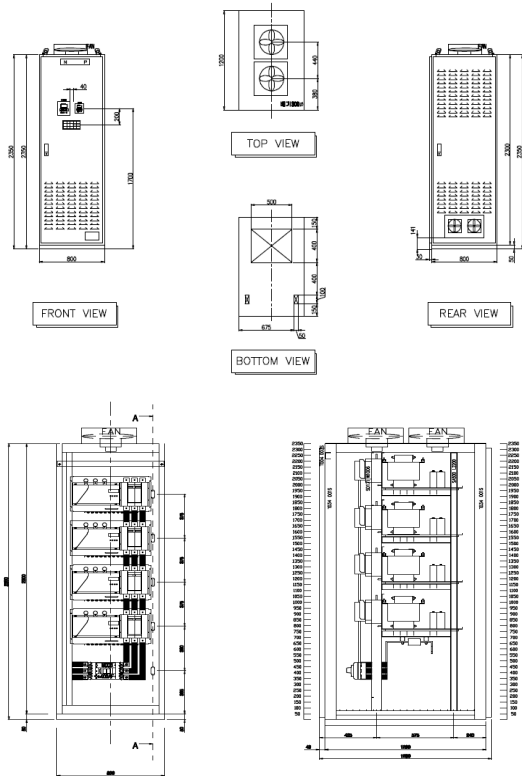


그림 12 SVC 외형도
Fig. 12 SVC outline

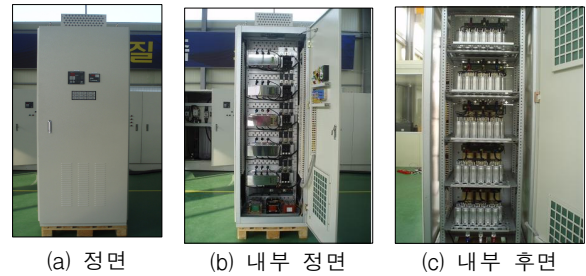


그림 13 개선용 SVC
Fig. 13 Improved SVC

표 3 250[kVAR] 급 사양
Table 3 250[kVAR] specifications

구분	사양
Rated Voltage	480[V]
Frequency	60[Hz]
Rated Power	250[kVAR]
Step size	50,100[kVAR]
Max. number of steps	11 Steps
Physical output(s)	1 to 4 per cubicle
Maximum power per cubicle	250[kVAR]

SCR 스위칭	2200[V] 200[A]
Modularity	Modular design. Steps are added in parallel
Capacitors	Dry type self healing.
Tuning reactor	Designed according to IEC 80631 1&2
Tolerance	+/- 10[%] in voltage, +/- 5[%] in frequency
CT requirement	1 CT required (class 1.0 or better), 1 or 5[A] secondary
Communication	RS485
Programming	communication converter
스위칭 Response time	16[ms] 이하 (External trigger: instantaneous)
Color	Munsell
Degree of protection	IP21~53 (touch proof with open door)
Cable entry	Top (optional bottom cable entry)
Ambient temperature	- 10[°C] to +40[°C] max. average
Cubicle dimensions	750×1280×2250[mm] (W×D×H)
Installation	Free floor standing
Environment	Indoor installation in clean environment
Humidity	Up to 1000[m] altitude
Main options	Base frame, Main breaker Cable entry cubicle with bus bar(bottom cable entry) Temperature probes, Surge arresters IP21 protection, RS485 converter Tuning reactors, Special reactor execution Tinned bus bars, Dampers

4. 실험 및 결과

4.1 각 상별 주요차수별 전압 고조파 개선 실험 및 결과

제안하는 SVC를 시험용 부하 480[V] 3P 60[Hz] 62.5[kVAR] 1STEP를 제작하여 480[V] 3P 60[Hz] 100[A]의 고조파 발생기를 이용하여 제작품을 병렬 연결하여 실험하였고, 표 4는 실험환경 하에서의 각 상별 주요차수별 전압 고조파 데이터를 나타낸다. 전압 고조파가 step off에 비교하여 step on 상태일 때 전체 전압은 증가하고 전압 왜형률(VTHD)은 감소하였다. 각 상에 따라서는 R상의 경우 66.8[%], S상의 경우 70.6[%], T상의 경우 67.5[%] 감소량을 보였다.

그림 14는 SVC 투입 전과 투입 후의 전압 파형을 나타낸다. SVC 투입 전의 전압 파형은 심한 왜형파였으나 SVC 투입 후 전압 파형이 보상됨으로써 투입 전에 비해 매끄러운 정현파를 나타내었다.

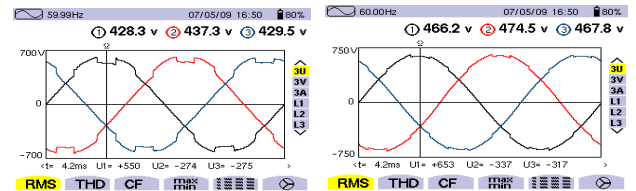
표 5는 제안하는 SVC를 실제 환경인 울산화력 발전소의 2발전소 4호기 전기집진기의 DC 3000[mA]의 부하시에 480[V] 250[kVAR]을 62.5[kVAR]의 4 STEP으로 조정하여

성능 확인을 하였다. 설치한 후 발전소의 각 상과 주요차수별 전압 왜형률(VTHD)과 전압고조파의 변화를 나타낸 것이다. Step off상태일 때 VTHD이 최고 3.2[%]였고 주요 차수별 전압 고조파는 5차일 경우 2.3[%], 7차일 경우 1.6[%], 11차일 경우 1.2[%]였다. SVC를 하나씩 step on하게 될 때 마다 VTHD와 차수별 전압 고조파가 감소하였다.

표 4 각 상별 주요차수별 전압 고조파 데이터[실험환경]

Table 4 Voltage harmonics data

구분	전압 rms(V)					감소량(%)
	LINE	전체(V)	전압 왜형률/고조파(%)			
			VTHD	5차	7차	
STEP OFF	R	428.4	7.67	6.1	3.7	
	S	437.4	7.63	6.0	3.8	
	T	429.5	7.79	6.2	4.0	
STEP ON	R	466.8	2.54	1.0	1.2	66.8
	S	475.3	2.24	1.1	1.1	70.6
	T	469.0	2.52	1.0	1.1	67.5



(a) SVC 투입 전 전압 파형 (b) SVC 투입 후 전압 파형

그림 14 SVC 투입에 따른 전압 파형

Fig. 14 Voltage waveform

표 5 각 상별 주요차수별 전압고조파 데이터[설치]

Table 5 Voltage harmonics data

구분	LINE	VTHD (%)	주요 차수별 전압 고조파(%)		
			5차	7차	11차
ALL STEPS OFF	R	2.8	2.1	1.6	1.0
	S	2.7	2.3	1.5	0.9
	T	3.2	2.1	1.3	1.2
1 STEP ON	R	2.0	1.8	1.4	0.8
	S	2.0	1.8	1.4	0.9
	T	2.1	1.6	1.4	1.1
2 STEPS ON	R	1.9	1.4	1.4	0.8
	S	1.9	1.7	1.4	0.7
	T	1.9	1.5	1.2	1.0
3 STEPS ON	R	1.8	1.2	1.4	0.9
	S	1.7	1.5	1.2	0.7
	T	1.7	1.4	1.2	1.0
4 STEPS ON	R	1.6	1.0	1.0	0.7
	S	1.5	1.0	1.1	0.7
	T	1.4	1.2	0.7	0.4

표 6은 SVC의 4개의 step이 모두 off일 때의 R, S, T 상 중 전압 왜형률(VTHD)과 전압 고조파가 최대일 때를 기준으로 4개의 step이 모두 on 일 때, VTHD와 전압 고조파의 변화량을 나타낸다. VTHD는 T상에서 실효값이 3.2[%]에서

1.4[%]로 감소하여 1.8[%](백분율 56[%]) 감소하였다. 전압 고조파는 5차에서 S상, 7차에서 T상, 11차에서 T상의 실효값이 가장 많이 감소하였고 전체적으로 50[%] 이상의 감소 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 한국전력 전기사업법 규제치인 3[%] 이하로 절감되었음을 나타낸다.

표 6 4 STEPS ON일 때 상별 전압 변화량

Table 6 Maximum voltage variation when 4 steps on

구분		VTHD (T상)	5차 (S상)	7차 (T상)	11차 (T상)
전압 고조파 감소량	실효값(%)	1.8	1.3	0.6	0.8
	백분율(%)	56	56	46	66

4.2 각 상별 주요차수별 전류 고조파 개선 실험 및 결과

표 7은 실험환경(4.1절과 동일) 하에서의 각 상 및 주요차수별 전류 고조파 데이터를 나타내고 그림 15는 SVC 투입에 따른 전류 파형을 나타낸다. 전류 고조파가 step off에 비교하여 step on 상태일 때 전체 전류 및 5차 고조파 전류가 감소하였다. 각 상에 따라서는 R상의 경우 85.2[%], S상의 경우 84.5[%], T상의 경우 88.3[%] 감소량을 보였다.

표 7 각 상과 주요차수별 전류 고조파 데이터 [실험환경]

Table 7 Current harmonics data

구분	전류 rms (A)				5차고조파감소량 (%)
	LINE	전체(A)	5차고조파		
			%	A	
STEP OFF	R	58.2	15.4	8.8	
	S	53.2	16.0	8.4	
	T	56.4	15.7	8.6	
STEP ON	R	16.6	5.3	1.3	85.2
	S	17.0	5.1	1.3	84.5
	T	18.3	3.8	1.0	88.3

표 8은 제안하는 SVC를 발전소에 직접 설치(4.1절과 동일)한 후 발전소의 각 상의 전류 실효치와 전류 총 고조파 및 주요차수별 전류 고조파의 변화를 나타낸 것이다. Step off 상태일 때에 비해 SVC를 하나씩의 step on하게 될 때마다 전류 고조파가 감소하였다.

표 9는 SVC의 4개의 step이 모두 off일 때의 R, S, T 상 중 실효 전류값(Irms)과 전류 고조파 및 차수별 고조파가 최대일 때를 기준으로 4개의 step이 모두 on 일 때, Irms와 전류 고조파 및 5차, 7차, 11차 전류 고조파의 변화량을 나타낸다. Irms는 S상에서 566[A]에서 242[A]로 324[A], 약 57[%] 감소하였다. 전류 고조파는 S상, 전류 고조파는 5차에서 S상, 7차에서 T상, 11차에서 T상의 실효값이 가장 많이 감소하였다.

표 8 각 상별 주요차수별 전류 고조파 데이터[설치]

Table 8 Current harmonics data

구분	LINE	Irms (A)	전류 고조파 (A)	주요 차수별 전류 고조파(A)		
				5차	7차	11차
ALL STEPS OFF	R	538.8	118.5	50.86	37.37	14.53
	S	566.0	124.3	37.98	45.81	16.20
	T	521.6	108.6	46.58	38.99	13.67
1 STEP ON	R	462.6	104.3	36.19	30.96	12.21
	S	480.6	108.5	26.47	41.67	14.22
	T	416.4	92.7	31.65	35.76	13.15
2 STEPS ON	R	366.5	82.4	22.88	31.23	13.80
	S	374.3	87.9	20.39	35.23	12.24
	T	336.3	77.4	21.66	32.99	12.33
3 STEPS ON	R	317.3	67.3	21.47	29.56	12.76
	S	315.3	66.5	20.91	33.08	11.55
	T	278.6	61.0	21.51	30.65	10.22
4 STEPS ON	R	305.2	58.5	22.00	28.11	11.91
	S	242.0	56.1	18.77	27.91	8.42
	T	229.9	54.2	24.86	23.23	6.74

표 9 4 STEPS ON일 때 상별 전류 변화량

Table 9 Maximum current variation when 4 steps on

구분	Irms (S상)	전류 고조파 (S상)	5차 (S상)	7차 (T상)	11차 (T상)	
고조파 전류 감소량	실효값(%)	324	68.2	1.3	0.6	0.8
	백분율(%)	57	54	56	46	66

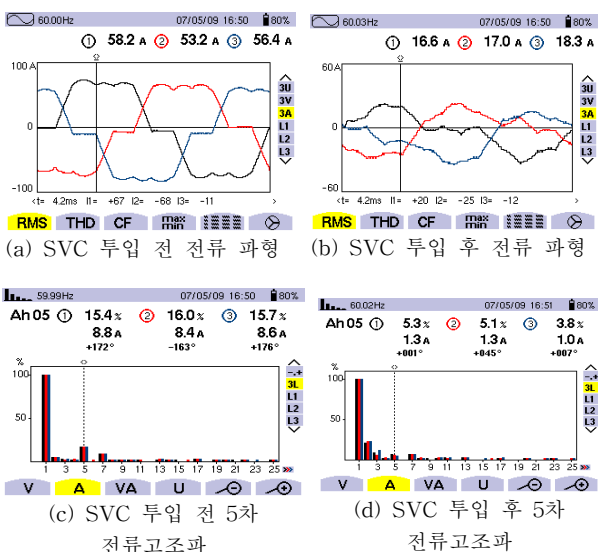


그림 15 SVC 투입에 따른 전류 파형

Fig. 15 Current waveform

그림 16은 R, S, T상의 고조파 전류값 변동 그래프이다. SVC를 한 개씩 step on할 때마다 전류값이 감소하였고 모두 step off를 하였다가 모두 step on하여도 단계별 step on할 때와 같은 효과를 나타내었다.

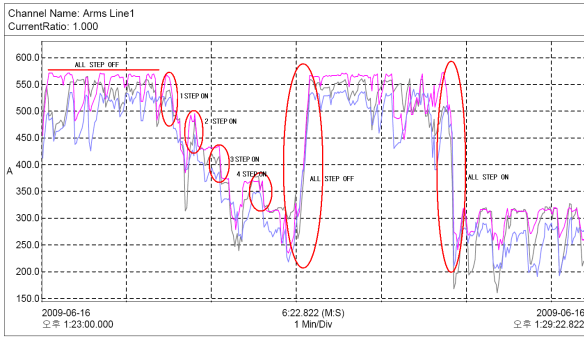


그림 16 R, S, T상 고조파 전류값 변동 그래프
Fig. 16 R, S, T-phase harmonic current variation grape

4.3 전체 역률 개선 실험 및 결과

그림 17은 역률 변동 그래프이다. SVC를 한 개씩 step on할 때마다 역률이 증가하였고 모두 step off를 하였다가 모두 step on하여도 단계별 step on할 때와 같은 효과를 나타내었다.

표 10은 제안하는 SVC를 발전소에 직접 설치한 후 발전소의 역률 변화를 나타낸 것이고 그림 18은 이에 따른 역률 그래프이다. 모두 step off일 경우 역률이 R상 46[%], S상 48[%], T상 45[%]로 전체 46[%]였으나 SVC를 단계별 step on할 때마다 역률이 증가하였고 4개를 모두 step on시켰을 때 R상 91[%], S상 82[%], T상 97[%]로 전체 90[%]까지 증가하였다.

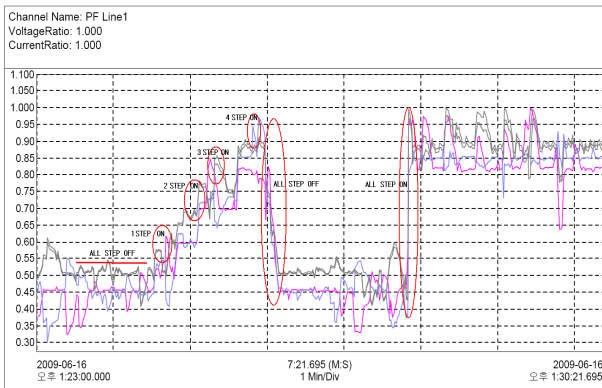


그림 17 역률 변동 그래프
Fig. 17 Power factor variation grape

표 10 역률
Table 10 Power factor

구분	R	S	T	전체
ALL STEPS OFF	0.46	0.48	0.45	0.46
1 STEP ON	0.57	0.52	0.53	0.54
2 STEPS ON	0.70	0.60	0.58	0.63
3 STEPS ON	0.86	0.76	0.64	0.75
4 STEPS ON	0.91	0.82	0.97	0.90

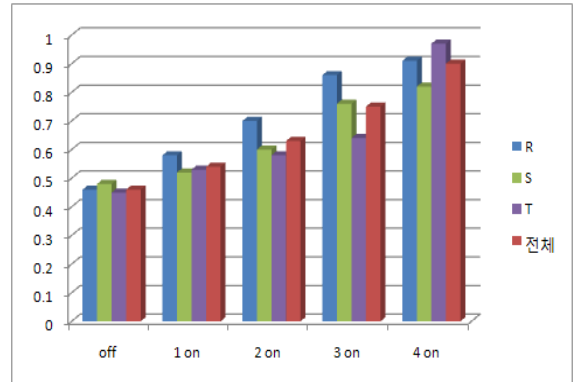


그림 18 역률 그래프
Fig. 18 Power factor grape

5. 결 론

본 논문에서는 전기집진기의 고조파 및 전압강하를 개선하는 설비와 이를 실시간으로 전력 상태를 제어할 수 있는 발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC 개발에 관하여 연구하였다.

제안된 SVC 시스템은 실험환경 하에서는 전압 왜형률 [%]이 R, S, T상 각각이 7.67, 7.63, 7.79에서 2.54, 2.24, 2.52로 감소하였고, 5차 고조파도 6.1, 6.0, 6.2에서 1.0, 1.1, 1.0으로 감소하였다. 또한 전류 왜형률[%]은 5차 고조파의 경우 15.4, 16.0, 15.7에서 5.3, 5.1, 3.8로 감소하였다. 실제 설치된 발전소에서는 전압 왜형률[%]이 R, S, T상 각각이 2.8, 2.7, 3.2에서 1.6, 1.5, 1.4로 감소하였고, 5차 고조파도 2.1, 2.3, 2.1에서 1.0, 1.0, 1.2로 감소하였으며, 전류의 경우 5차 고조파의 전류[A]가 50.86, 37.98, 46.58에서 22.0, 18.77, 24.86으로 감소하였다. 또한 역률[%] T상에서 step off일 때 45가 step on일 때는 97까지 변화를 보였으며 R, S, T상 평균으로는 46서 90으로 개선되어 제안된 SVC 시스템이 역률과 고조파를 개선하여 전력 시스템의 안정화와 효율 향상에 기여함을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 개선용 SVC는 전기집진기 및 용접기로 야기되는 고조파 및 전압 강하를 제안된 스위칭 컨트롤러와 스위칭 제어 알고리즘을 적용하여 개선하고 스위칭 컨트롤러의 RS-485 통신부를 이용하여 원격지에서 스위칭 상태를 실시간으로 입력받아 발전소 내 설비의 전력 상태를 최적화할 수 있는 장치로 실시간 전력진단과 분석이 가능하게 되어 전압변동 및 역률 고조파 개선이 가능하게 된다.

참 고 문 헌

[1] 한국전기안전공사, “전기사용장소의 고조파 장애분석 연구,” 1996년
 [2] 한국조명전기설비학회, “전해조 부하의 고조파 측정 및 평가에 관한 연구,” 2006년
 [3] TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC “SVC SOLUTION,” 2007년

- [4] 이창석, 민현홍, 이보훈, 정영식, 윤광희, 이희진, 김용태, "정지형 무효전력 보상장치의 스위칭 속도 향상 제어 기법," 한국 퍼지 및 지능시스템학회 2011년도 춘계학술대회 학술발표 논문집, Vol. 21, No. 1, pp. 53-54, 성남, 2011년 4월
- [5] 윤광희, 이희진, "발전소 소내전력 고조파 및 역률 개선용 SVC에 관한 연구," ICS' 2011 정보 및 제어 심포지엄 논문집, pp. 285-286, 용인, 2011년 4월
- [6] 대한전기학회, "최신 배전시스템 공학," 2006년
- [7] 한국전력공사, "기본공급약관," 2011년
- [8] 전기설비학회, "현장 시험에 의한 중성선 고조파 전류 측정, 모델링 및 수동필터 적용에 관한 연구," 2003년
- [9] IEEE std. 519, "Harmonic allowance standards,"
- [10] T. J. E. Miller, "Reactive Power Control in Electric System." pp. 1-48, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [11] R. L. Hauth, "Application of a Static Var System to regulate System Voltage in Western Nebrasks," IEEE PAS, Vol. PAS-97, pp. 1995-1962, 1978.

저 자 소 개



윤 광 희 (尹 光 熙)

1975년 12월 15일 생. 2006년 한경대학교 정보제어공학과 졸업. 2011년 한경대학교 대학원 신호처리전공 졸업(석사). 2010년 ~ 현재 연세대학교 공학대학원 전기전자전공 재학. 1993년~1999년 (주)삼화콘덴서 근무, 2000년~2002년 (주)한성중전기 근무. 2002년~2004년 한성산전 대표이사, 2004~현재 (주)파워닉스 대표이사.

Tel : 031-672-6816

E-mail : ykh@powernix.kr



이 희 진 (李 羲 振)

1964년 9월 10일 생. 1987년 연세대학교 전자공학과 졸업. 1989년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1989년~1993년 (주) 대우통신 종합연구소 연구원. 1993년~1995년 (주) 에스원 종합연구소 연구원. 1998년 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1998년~현재 국립한경대학교 정보제어공학과 교수.

Tel : 031-670-5294

E-mail : lhjin@hknu.ac.kr