멀티-스텝 인버터를 이용한 무효전력 보상장치의 고조파 저감

Reducing the Harmonics of Static Var Compensator Using Multi-Step Inverter

박현철*, 김영민, 황종선, 김종만
(HyunChul Park, YeongMin Kim, JongSun Hwang, JongManl Kim)

Abstract

For stabilization and improving power factor in the power lines, various Static Var Compensators(SVC) have been considered to be installed and partly applicated already.

With all these merits of the SVC, it stil has demerits, principally evoking harmonic problems. So far, many harmonic reduction type inverters have been used in various parts.

In this paper, the reactive power is controlled by amplitude of the output voltage. This paper propose that the multiple voltage source inverter have controllable power factor made by load vary at receive-stage as lagging and leakage control. The theoretical analysis on this system was confirmed through the computer simulation and the experiments.

Key words; Static Var Compensators, multiple voltage source inverter, power factor

1.장 서 론

전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 정지형 전력 변환 장치가 전력 계통에 사용될 경우 송·배전 계통의 역율 저하와, 전력 동요, 전압 플리커, 고조파 등 여러 문제점이 발생한다[1-5].

특히 인버터는 전력 변환 과정에서 출력측 파형이 구형파이므로 다량의 고조파가 포함되어 있어, 송·배전 계통에서 보호 계전기의 오동작, 오표시, 전화 회선의 음성 잡음, 일렉트로닉스 관련 기기의 유도 장해 등의 문제점이 발생되어, 고조파를 저감하기 위한 몇 가지 방법들이 제안되고 있다.

PWM제어법는 저차 고조파를 제거할 뿐만 아니라 출력전압·전류 제어가 가능하여 고성능 제어 시스템에 적용할 수 있는 장점이 있어 소형기기에 널리 사용되고 있다. 그러나 수백KVA~수백MVA급에서는 스위칭 손실 및 스너버 손실이 많아 사용이 곤란하다.

또한 다중화법는 인버터에 여러 대의 변압기를 병렬로 접속하면 고조파가 저차부터 고차까지 감소시킬 수 있으나 시스템이 대형화되어 가격이 상승하고 부피가 커져 사용이 곤란하다.

최근에는 멀티 스텝 인버터에 관한 연구가 이루어지고 있는데 이는 직류측에 단권 변압기를 접속하고 탭을 부가하여 INV-Ⅰ, INV-Ⅱ을 병렬로 접속하여 3탭의 경우 36스텝화 할 수 있어, 어느 정도 시스템의 대형화를 억제할 수 있어서 경제성과 부피 절감 등의 장점이 있다[8,9].

본 연구에서는 무효 전력을 보상하기 위해서 입력측 콘덴서를 제거하고, 직류 전원부에 2차 권선과 단상 브리지 인버터(보조 회로)를 설치한 후, 여기에 평활된 콘덴서에 E_d을 추가하면, 수전측 부하 변동에 따라 역율을 진상·지상 제어가 되고 고조파 저감이 가능한 무효 전력 보상 장치(SVC)를 제안하였다. 또, 이 인버터에 대한 기본 원리를 도식적 방법으로 해석하며, 시뮬레이션을 통하여 최적 권수비

* 정인대학 정보통신계열
(전북 정주시 시기동 정인대학
Fax: 063-532-3768
E-mail :uvh2200@mail.chongin.ac.kr)

및 제어각를 각각 설정하였고, 시스템을 최적치 설계 조건으로 구성하여 무효 전력 제어가 기존의 방식과 동등하며 고조파 저감 효과가 기존의 방식보다 우수함을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증하였다.

2.장 멀티-스텝 인버터

2.1. 시스템 구성

본 연구에서 제시한 시스템은 그림2.1에 표시한 바와 같이 3상 인버터(INV-Ⅰ, INV-Ⅱ)를 주 회로로 사용했고, 소자 T_{r1}, T_{r2}, T_{r1}', T_{r2}' 는 단상정류 회로로 구성하여 동작시키고, 이 정류 회로에 단권 변압기를 접속하여 보조회로를 구성하였다. 또한 파선에 나타낸 보조회로와 콘덴서(E_d), 인버터(INV-Ⅰ, INV-Ⅱ)를 연결한다. 그리고 인버터 1차측에 변압기 Δ-Δ, Δ-Y로 구성한다. 이 시스템은 비교적 간단한 보조회로와 주 인버터 구성으로 1차측 전압 파형이 정현파에 가깝다는 큰 개선점을 가지면서, 콘덴서 전압Ed로 부하측 부하변동에 따라 무효전력을 진상 제어가 가능하다는 장점이 있다.

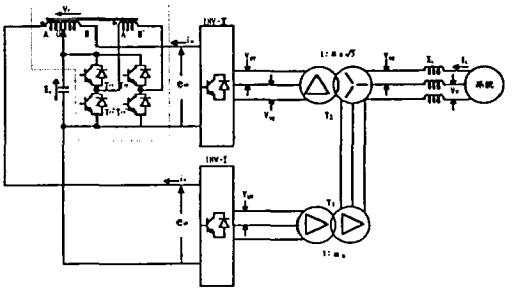


그림 2.1. 36스텝 전압형 인버터

Fig.2.1. 36 step voltage source inverter

2.2. 동작원리

그림 2.1은 36스텝 전압원인버터 회로이며, 파선 부분은 본 연구에서 제안된 보조회로이다. 보조회로는 상간리액터 2차측에 설치된 권선 A′, B′사이 권선을 N_o, 1차측 권선 중점 O에 대한 AO 및 OB사이 권선을 N_1이라 하면, 상간리액터 권수비 a_m을 N_1/N_o라 한다. 보조회로 스위칭 소자 T_{r1}, T_{r1}' 및 T_{r2}, T_{r2}'의 제어각을 각각 β_1, β_2로 동작시키고, O점은 주 인버터 INV-Ⅰ의 전류시에 사용하고, T_{r1} 및 T_{r2}를 비대칭 제어하면 보조회로 동작은 그림 2.2에 표시한 바와 같이 4개의 동작모드로 나누어진다.

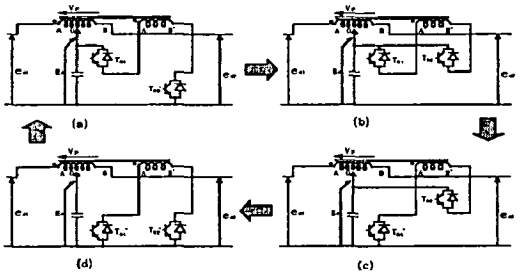


그림 2.2. 보조회로의 동작 모드

Fig.2.2. Operation mode of sub-circuits

모드 A에서 인버터 입력 전압을 e_{d1}, e_{d2}라 하고, AO, OB 사이의 전압 V_P을 상간리액터 전압이라고 하면, 다음 수식(2.1)과 같이 놓을 수 있다.

$$e_{d1} = E_d + V_P \qquad e_{d2} = E_d - V_P \tag{2.1}$$

단 $V_p = a_m E_d$이다.

모드 B, C, D에서도 인버터 입력 전압 e_{d1}, e_{d2}를 구할 때는 수식(2.1)을 사용하고, 상간리액터 전압 V_p는 수식(2.2)와 같이 놓을 수 있다.

$$\left.\begin{aligned} &\text{모드}B: \ V_P = 0 \\ &\text{모드}C: \ V_P = -a_m E_d \\ &\text{모드}D: \ V_P = 0 \end{aligned}\right\} \tag{2.2}$$

3.장 시뮬레이션 및 실험

본 시스템에서 제시한 출력 전압 파형을 36스텝으로 다중화하는 이론은 일반 인버터에서 변압기를 Δ-Δ, Δ-Y로 구성하면 24스텝이 가능한 인버터가 되지만 여기에 보조회로을 부과하여 36스텝까지 다중화 하는 방법으로, 상간리액터 권수비와 브리지 회로의 제어각을 어떻게 구성하느냐에 따라 인버터의 출력 전압을 다중화하는 방법이다. 본 논문에서는 36스텝 출력전압파형을 퓨리에 급수로 전개하여 왜형율이 최소가 되도록 시뮬레이션을 통하여 권수비와 제어각을 결정하였다.

3.1. 왜형율의 최소 조건

출력 전압 파형을 36스텝화 하기 위해서는 입력

전압 e_{d1}, e_{d2}를 3레벨 파형으로 해야 한다. 출력전압 파형의 왜형율을 최소로하는 μ는 다음식과 같다.

$$\mu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}(V_{RSn})^2}}{V_{RS1}} = \sqrt{(\frac{V_{RS}}{V_{RS1}})^2 - 1} \times 100(\%) \quad (3.1)$$

여기서, V_{RSn} : n차 고조파 실효치, V_{RS1} : 기본파 실효치, V_{RS} : 전 실효치이다.

$$V_{RS} = \frac{a_s E_d}{3}\sqrt{12 + 6\sqrt{3} + (8 - 4\sqrt{3})a_m^2} \quad (3.2)$$

$$V_{RSn} = a_n a_s \sin(n\theta) \quad (3.3)$$

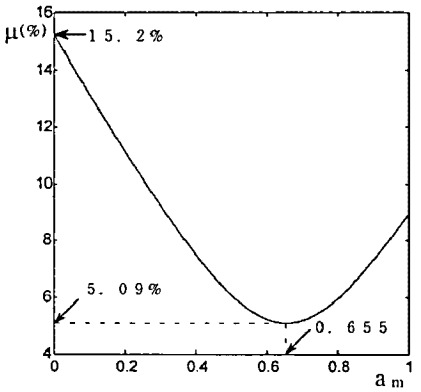


그림 3.1. 왜형율이 최소인 권수비 결정

Fig.3.1. Decision of distortion factor(μ) and turn ratio(a_m)

a_m에 대한 왜형율 μ의 변화를 시뮬레이션한 결과를 그림 3.1에 나타내었다. 그림3.1에서 최적 권수비 a_m=0.655로 구해졌고, 왜형율 5.09%는 12스텝 파형과 비교해서 약1/3이 되었다.

3.2. 고조파 함유율 및 실험결과

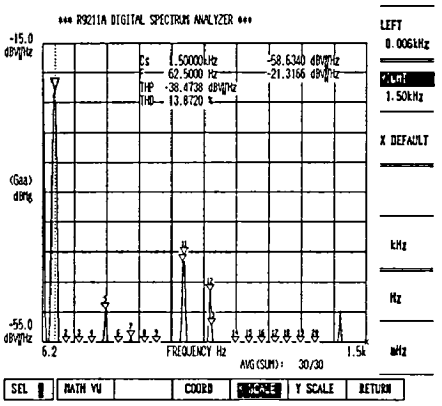
시뮬레이션 결과 최적치를 적용할 경우 각각의 고조파 함유율을 표3.1에 나타내었다. 본 방식의 고조파 함유율이 기존의 12스텝과 비교해서 왜형율이 15.2%에서 5.09%로 되어, 본 방식의 고조파 함유율이 12스텝 파형과 비교하여 고조파저감 효과가 우수함을 명확하게 보여준다.

표 3.1. 고조파 함유율

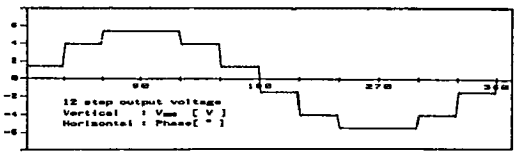
Table3.1. Harmonic components of output voltage

고조파차수	고조파 함유율 V_{RSn}/V_{RS1}	
	12스텝방식	36스텝방식
11	9.09	0.39
13	7.69	0.44
23	4.35	0.25
25	4.00	0.17
35	2.86	2.86
37	2.70	2.70
47	2.13	0.09
49	2.04	0.12
59	1.69	0.10
61	1.64	0.07
71	1.41	1.14
73	1.37	1.37
왜형율(%)	15.2	5.09

12스텝 인버터의 출력전압 파형과 36스텝 인버터의 전압파형 및 고조파 스펙트럼은 다음과 같다.



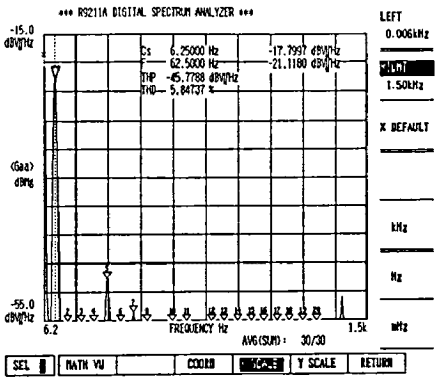
(a) 12스텝 고조파 스펙트럼



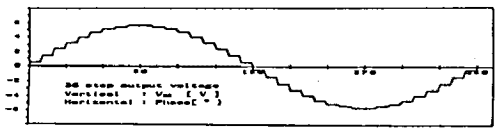
(b) 12스텝 전압파형

그림 3.2. 12스텝 전압파형 및 고조파 스펙트럼

Fig.3.2. Harmonic spectrum and Output voltage waveform



(a) 36스텝 전압파형



(b) 36스텝 전압파형

그림 3.3. 36스텝 전압파형 및 고조파 스펙트럼

Fig.3.3. Harmonic spectrum and Output voltage waveform

5.장 결 론

본 연구에서는 두 대의 인버터에 상간리액터를 접속하고 상간리액터에 콘덴서와 스위칭소자를 접속하여 보조회로를 제어함으로서 출력측의 전압의 왜형율을 저감하고, 리액터를 통하여 출력전압은 더욱 정현파에 가깝게 했으며, 고조파를 효과적으로 저감시킬 수 있는 36스텝 3상 전압형 인버터를 이용한 무효전력보상장치에 관하여 연구하였다.

연구 결과 출력전압의 왜형율이 12스텝 제어시 15.2%에서 36스텝시 5.09%까지 감소가 가능함을 보였고, 고조파 저감효과가 현저한 것을 입증하였다. 이 경우 직렬연결 다중화 인버터에 비하여 회로구성이 간단하고, 고조파효과도 거의 동등하므로 가격면에 경제적이다.

본 연구에서 제시한 36스텝 고조파 저감형 무효전력보상장치는 송·배전설비에 사용하고있는 조상기 시스템을 대치할 수 있고, 대용량 부하를 사용하는 수전설비에 사용하며, 전기철도, 고속전철도 등에 적용될 것으로 사료되며, 펄스 수를 더욱 증가시켜 고조파 저감 효과를 증대시키고, 또한 인버터 2차측에 설치된 변압기 제거하는 방법으로 인버터를 비대칭 제어하는 방법에 관해서도 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] T. Ueno, "Formation of Harmonic Waves and it's Calculation in Electric Power System," JIEE 49-B41, pp. 9-16, July, 1974.

[2] Keiju Matsui et al, "A Dual Thyristor Converter Reducing Harmonics of Power Supply Without Input Transformer," IEEE Trans. Ind. Appl. vol.27 no.1, Jan/Feb, 1991.

[3] D. D. Shipp, "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-15, no. 5, Spet/Oct. 1979.

[4] R. P. Stratford, "Analysis and Control Systems with Static Power Converters," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-17, no. 1, Jan/Feb, 1981.

[5] D. E. Steeper et al, "Reactive Compensation and Harmonic Suppression for Industrial Power Systems Using Thyristor Converters," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-12, no. 3, May/June, 1976..

[6] F. Curtarelli, "Current Harmonics in Industial Power Systems Arising from AC/DC Converters," IPEC-Tokyo '83, vol. IEC-28, no. 4, NOV., 1981.

[7] 松野, 長澤, 大槻, 大西, 竹田 " 自勵式 インバータを 用いた 無效電力補償裝置による系統安定度の向上" 全學論B, 112卷1号, P.57, (平4-1)

[8] 常盤, 市川, 色川, 北原 "電力系統用自勵式SVCの開發" 全學論B, 113卷 2号, P.168, (平5-2)

[9] 春本, 矢野, 松浦 "自勵式インバータを 用いた 電力用調相設備の考案" 全學論B, 106卷2号, P.25, (昭60-2)