

계통 연계형 풍력발전 시스템의 고조파 저감 및 무효전력 보상

Reduction of Harmonics and Compensation of Reactive Power about Wind Power Generation System Connected to Grid

김영민*, 황중선, 김종만, 박현철, 송승호

(Yeong Min Kim*, Jong Sun Hwang, Jong Man Kim, Hyun Chul Park, Seung Ho Song)

Abstract

In this paper, a novel multi voltage inverter system is proposed for reductions of harmonics, which can compensate reactive power. At first, we remove capacitor at input side for reactive power compensation. Secondly, by adding DC voltage to the filter capacitor, it can control power factors as lead-phase according to alterations of loads at power reception. Thirdly, if winding and single phase-bridge inverter(auxiliary circuit) is installed to DC power for reduction of harmonic, waveform of output voltages become to 36-steps. Thus, SVC(static var compensator) systems which can reduce harmonics are designed.

Key Words: reactive power, harmonic, auxiliary circuit, power factor, var compensator

1. 서론

최근 관심이 고조되고 있는 풍력발전 및 태양광 발전 등 대체에너지원은 대부분 그 규모가 수 kW ~ 수백 kW의 비교적 작은 전원으로 전력 소비지 부근에 분산된 형태로 보급되고 있으며, 안정적이고 효율적인 운전을 위해서는 상용 계통과의 연계를 통한 병렬 운전이 필요하다. 불특정 다수의 분산형 인버터 시스템을 상용계통과 연계하여 병렬운전할 경우에는 양질의 전력을 공급할 수 있도록 배전선의 전력 품질과 안정성을 저하시키지 않아야 한다. 그러나 최근 부하 용량의 증가에 따른 인버터간의 병렬 운전, 반도체 전력 변환장치의 사용 증가 등으로 인하여 고조파 발생량이 증가하고 있다. 전원계통에 유입된 고조파는 기계의 손실증가, 이상소음, 과열,

토오크 맥동의 원인이 되고, 또한 통신선로의 유도 장애 및 신호장애 등을 유발한다[1]. 그리고 전원계통에서 발생된 무효전력은 전원설비의 용량이나 손실의 증대를 초래하며, 계통의 전압변동을 일으켜 부하측에 플리커 현상을 일으키거나, 전동기 정속도 운전이 불가능 한 문제 등을 일으킨다. 이에 대한 무효전력보상장치로 회전형과 정지형이 있으나 정지형은 대전력 계통에 의한 전력공급의 신뢰도향상 및 보수, 손실, 가격 측면에서 유리하여 현재 TSC (Thyristor - Switched Capacitor), TCR (Thyristor - Controlled Reactor), MSC (Mechanically Switched Capacitor)등이 널리 사용되고 있다[2-4]. 이러한 정지형 무효전력 보상장치는 진상 또는 지상으로 부하가 일정한 경우에만 효율적으로 동작하고, 제어응답속도가 느리며 무효전력보상의 정밀도가 높지 못하여, 최근에는 인버터를 이용한 무효전력 보상장치가 개발되어 진상 무효전력으로부터 지상 무효전력까지 연속적으로 조정되고 제어성, 경제성이 우수하며 운전 및 보수가 용이하여 무효전력을 제어

* 담양대학 컴퓨터응용전기시스템과
(전남 담양군 담양읍 향교리 담양대학,
Fax: 061-380-8466
E-mail : ymkim@damyang.damyang.ac.kr)

하는데 사용되고 있다. 그러나 이러한 인버터를 이용한 무효전력 보상장치는 자체 운전시 고조파가 발생이 적지 않기 때문에 본 연구에서는 입력측에 보조회로를 추가하여 고조파 및 무효전력을 효율적으로 제어할 수 있는 새로운 방식을 제안하였다.

2. 계통 연계형 풍력발전 시스템의 무효전력 보상

2.1 무효전력의 제어 원리

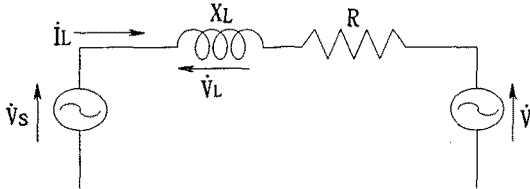
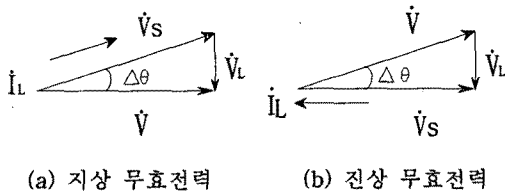


그림 1. 단상 등가회로

Fig. 1. Single phase equivalent circuit

그림 1은 무효전력 보상장치를 직접 전원에 접속한 경우의 단상 등가회로를 표시한 것이다. 여기서 무효전력 보상장치의 출력전압은 이상적인 정현파 전압 \dot{V} , 전원전압을 \dot{V}_s , 변압기 누설 인덕턴스를 L , 저항을 R , 변압기 양단전압을 \dot{V}_L , 무효전력 보상 장치에 유입한 전원전류를 I_L 라 한다. 저항분 R 에 비해서 인덕턴스 L 이 아주 크기 때문에 저항을 무시하면 그림 2와 같은 무효전력보상장치의 출력전압 \dot{V} 와 전원전압 \dot{V}_s , 전원전류 I_L 벡터도가 얻어진다.

무효전력 발생량을 조정하기 위해서는 무효전력보상 장치의 출력전압진폭을 제어하여 $\dot{V}_s > \dot{V}$ 이면 지상 무효전력이, $\dot{V}_s < \dot{V}$ 이면 진상 무효전력이 발생한다.



(a) 지상 무효전력

(b) 진상 무효전력

그림 2. 벡터도

Fig. 2. Vector diagrams

2.2 전체 시스템 구성도

무효전력보상장치를 포함한 계통 연계형 풍력발전 시스템의 구성은 그림 3과 같다.

계통의 연계시 전력품질 확보를 위해 분산형전원의 계통 연계에 의한 배전선 전압 변동의 억제, 인버터를 이용한 분산전원의 경우는 고조파전류의 유출 억제, 역조류에 의한 전압이 상승으로 인해 전압의 적정치를 유지하기 어려우므로 분산형 전원측에서 무효전력을 조정하여 전압상승분 보상해야한다.

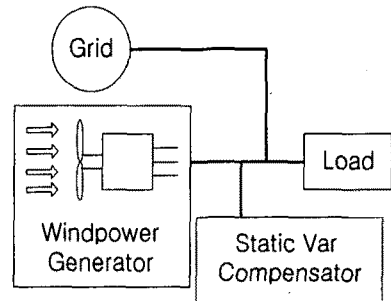


그림 3. 시스템 구성도

Fig. 3. Block diagram of systems

2.3 인버터를 이용한 무효전력 보상 회로

본 연구에서 제시한 시스템은 그림 4에 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 $\Delta-\Delta$, $\Delta-Y$ 로 구성한다.

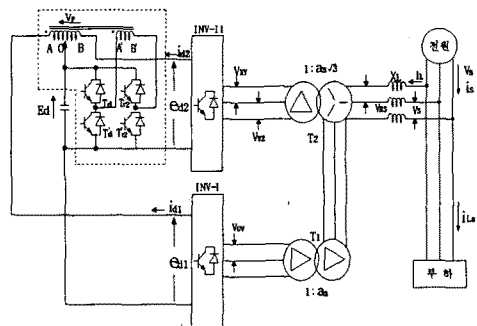


그림 4. 인버터를 이용한 SVC

Fig. 4. Voltage source inverter SVC

이 시스템은 비교적 간단한 보조회로와 주 인버터 구성으로 1차측 전압 파형이 정현파에 가깝다는 큰 개선점을 가지면서, 콘덴서 전압 E_d 로 부하측 부하변동에 따라 무효전력을 진상 제어가 가능하다는 장점이 있다.

2.4 동작원리

그림 4의 파선 부분은 본 연구에서 제안된 보조회로이다. 보조회로는 상간리액터 2차측에 설치된 권선 A' , B' 사이 권선을 N_0 , 1차측 권선 중점 O 에 대한 AO 및 OB 사이 권선을 N_1 이라 하면, 상간리액터 권수비 a_m 을 N_1/N_0 라 한다. 보조회로 스위칭 소자 T_{r1} , T_{r1}' 및 T_{r2} , T_{r2}' 의 제어각을 각각 β_1 , β_2 로 동작시키고, O 점은 주 인버터 $INV-I$ 의 전류시에 사용하고, T_{r1} 및 T_{r2} 를 비대칭 제어하면 보조회로 동작은 그림 5에 표시한 바와 같이 4개의 동작모드로 나누어진다.

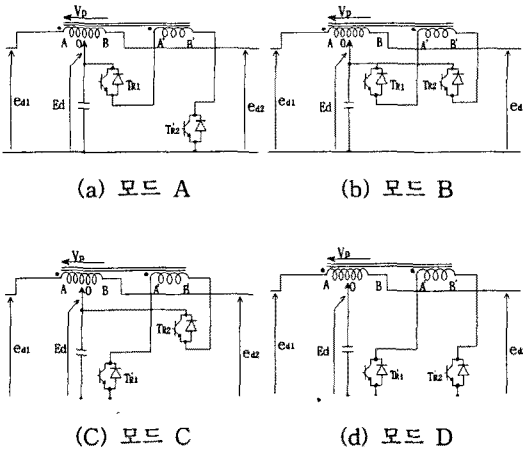


그림 5. 보조회로 동작모드

Fig. 5. Operation mode of sub-circuits

모드 A에서 인버터 입력 전압을 e_{d1} , e_{d2} 라 하고, AO , OB 사이의 전압 V_p 를 상간리액터 전압이라고 하면, 다음 수식(1)과 같이 놓을 수 있다.

$$e_{d1} = E_d + V_p \quad e_{d2} = E_d - V_p \quad (1)$$

단 $V_p = a_m E_d$ 이다.

모드 B, C, D에서도 인버터 입력 전압 e_{d1} , e_{d2} 를 구할 때는 수식(1)을 사용하고, 상간리액터 전압 V_p

는 수식(2)와 같이 놓을 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} \text{모드 B} : V_p &= 0 \\ \text{모드 C} : V_p &= -a_m E_d \\ \text{모드 D} : V_p &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3. 실험 및 결과

3.1 왜형율의 최소 조건

본 시스템에서 제시한 출력 전압 파형을 36스텝으로 다중화하는 이론은 일반 인버터에서 변압기를 Δ - Δ , Δ - Y 로 구성하면 24스텝이 가능한 인버터가 되지만 여기에 보조회로를 부가하여 36스텝까지 다중화 하는 방법으로, 상간리액터 권수비와 브리지회로의 제어각을 어떻게 구성하느냐에 따라 인버터의 출력 전압을 다중화 하는 방법이다.

출력 전압 파형을 36스텝화 하기 위해서는 입력 전압 e_{d1} , e_{d2} 를 3레벨 파형으로 해야 한다. 출력전압 파형의 왜형율을 최소로 하는 μ 는 다음식과 같다.

$$\mu = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_{RSn})^2}}{V_{RS1}} = \sqrt{\left(\frac{V_{RS}}{V_{RS1}}\right)^2 - 1} \times 100(\%) \quad (3)$$

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

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

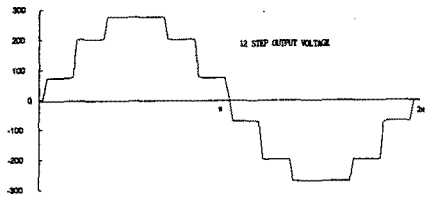
$$V_{RSn} = a_n a_s \sin(n\theta) \quad (5)$$

a_m 에 대한 왜형율 μ 의 변화를 시뮬레이션 결과 최적 권수비 $a_m = 0.655$ 로 구해졌고, 왜형율 5.09%는 왜형율이 15.2인 12스텝 파형과 비교해서 약 1/3이 되었다.

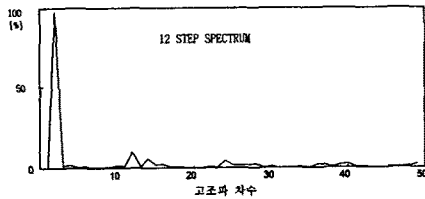
3.2 고조파 함유율 및 실험결과

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.

12스텝 인버터 및 36스텝 인버터의 출력전압 파형 및 고조파 스펙트럼은 각각 다음 그림 6, 7과 같다.



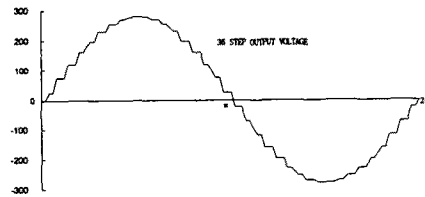
(a) 출력전압 파형



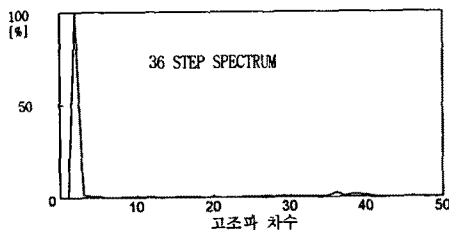
(b) 고조파 스펙트럼

그림 6. 출력전압 파형 및 고조파 스펙트럼(12스텝)

Fig. 6. Output voltage waveform and harmonic spectrum of 12-steps



(a) 출력전압 파형 ($a_m = 0.655$, $\beta_1 = 20^\circ$, $\beta_2 = 40^\circ$)



(b) 고조파 스펙트럼 ($a_m = 0.655$, $\beta_1 = 20^\circ$, $\beta_2 = 40^\circ$)

그림 7. 출력전압 파형 및 고조파 스펙트럼(36스텝)

Fig. 7. Output voltage waveform and harmonic spectrum of 36-steps

4. 결론

본 연구에서는 풍력발전 등 분산형 전원의 계통연 계측에 제안된 SVC를 접속하여 보조회로를 제어함으로써 출력측의 고조파를 효과적으로 저감시킬 수 있는 36스텝 3상 전압형 인버터를 이용한 무효전력 보상장치에 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 무효전력 보상장치는 송·배전설비에 사용하고있는 조상기 시스템을 대체할 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 방법에도 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 2002년도 기초전력공학 공동 연구소 차세대 풍력발전 연구센터 주관으로 수행중인 연구결과와 일부입니다.

참고 문헌

- [1] F. Curtarelli, "Current Harmonics in Industrial Power Systems Arising from AC/DC Converters," IPEC-Tokyo '83, vol. IEC-28, no. 4, NOV., 1981.
- [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] T. Ueno, "Formation of Harmonic Waves and it's Calculation in Electric Power System," JIEE 49-B41, pp. 9-16, July, 1974.