

멀티레벨 직렬 전압형 인버터를 이용한 무효전력보상기(SVC)의 제어

민 완 기^o, 박 용 배, 김 영 한 최 제 호
전력연구원 충북대학교

Control of Static Var Compensator Using A Cascade Typed Multilevel Voltage Source Inverter

Wan-Ki Min, Yong-Bae Park, Yeong-Han Kim
KEPRI of Korea Electric Power Cooperation
Jae-Ho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT Multilevel voltage source inverters are emerging as a new breed of power inverter options for high power applications. This paper presents a cascade typed multilevel voltage source inverter which has separate dc sources for high voltage. This inverter is proposed for flexible ac transmission systems (FACTS) including static var compensator(SVC), series compensation and phase shifting. It can solve the problems of conventional transformer-based multipulse inverters and the prblems of multilevel diode-clamped inverters. To show the superiority of multilevel cascaded inverter, simulation results are discussed in detail.

1. 서 론

전력계통에서 무효전력에 의한 수전단 전압강하와 송전용량의 한계가 문제가 되고 있고, 장거리 교류 전력송전과 부하의 증가에 따라서 전력계통의 안정화 및 공급 전압을 일정하게 유지하기 위하여 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)의 설치의 필요성이 절실히 요구되고 있다.

최근 전력용 반도체를 이용한 전력변환장치의 보급과 대용량화에 따라서 전압형 인버터를 사용한 무효전력보상기(SVC)는 종래의 TCR나 TSC를 대체하는 전력계통의 무효전력보상장치로 널리 사용되어 왔는데 변압기의 결선을 이용한 인버터로 무효전력을 제어하고, 고조파왜형율을 줄이고자 하였다[1-2]. 이 기법들은 설치비가 비싸고, 시스템 충손실의 크며, 포화전류에 의한 제어가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위하여 다이오드 크램핑(Clamping)과 프라이밍(Flying) 커패시터 멀티레벨(Multilevel) 인버터들을 SVC에 적용하는 방식들이 제안되었다.[3-6] 이 방식들은 변압기를 사용 할 필요가 없으나 다소의 문제점들을 가지고 있었다.

다이오드 크램핑 인버터의 경우 직류전압을 차단하기 위한 추가적인 크램핑 다이오드가 필요하게 되고, 각 직류 커패시터는 같은 직류전압으로 충전되어 있다고 가정하면 실제적인 적용에서 7 이나 9정도 레벨로 제한되며, 직류전압의 불균형을 해결하기 위해 별도의 제어기의 구성이 필요하게 되었다.[3, 5, 6]

비교적 새로운 방식인 프라이밍 커패시터 인버터는 전압의 불평형과 멀티레벨 다이오드 크램핑 인버터에서 많은 다이오드가 소요되는 문제점들을 해결하고자 제안 되었다.[4] 인버터를 구성하기 위해 소요되는 프라이밍 커패시터의 수는 기존의 인버터와 비교할 때 많이 소요된다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 기존의 멀티레벨 인버터의 문제점들을 개선하고, 변압기 없이 대용량 FACTS에 적용 가능한 직렬(Cascade)형 멀티레벨 인버터를 사용하여 SVC를 구성하였다. 제안된 직렬형 인버터는 스위칭손실 및 스너버 손실을 저감하기 위해 PWM제어를 하지 않고, 각 단상 FBI(Full Bridge Inverter)에 한 주기에 한 번만 스위칭을 하도록 설계를 하였으며, 직렬형 인버터를 10kVAR SVC에 적용하여 과도응답특성에 대하여 검토하였다.

2. 새로운 멀티레벨 인버터

그림 1은 제안된 M=7 레벨의 직렬 인버터의 구조이다. 반주기 동안 M 레벨의 출력전압을 만들기 위해서 직렬 연결된 (M-1)/2개의 단상 FBI 유니트들로 구성된다. 각 전파 브리지는 자체의 직류원을 가진다. 멀티레벨 인버터의 구성에 있어 필수적인 변압기, 크램핑 다이오드 및 프라이밍 커패시터는 필요 없게 된다.

그림 2는 그림 1의 회로에서 보여준 7레벨 직렬 인버터에서 발생된 출력파형의 결과이며 출력 상전압은 3개의 유니트의 합인 $V_{can} = V_{ca1} + V_{ca2} + V_{ca3}$ 이다. 순서적으로 직류원을 만들어 내는데 각 상별로 3개의 FBI 유니트를 교류전원에 연결하여 각 소자는 한 주기에 한 번만 스위칭을 하게 된다.

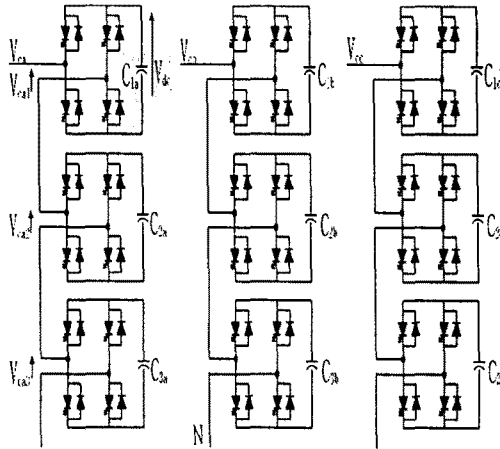


그림 17 레벨 직렬 인버터의 3상 Y결선 구조

새로운 직렬 인버터는 종래의 멀티레벨 및 다중펄스 인버터들의 문제점들을 개선 하였는데, 기존의 멀티레벨 인버터에서 요구되는 부피가 큰 변압기를 제거 할 수 있고, 멀티레벨 다이오드 크랩 인버터에서 필요한 다이오드와 프라임 커패시터 인버터에서 필요한 프라임 커패시터는 불필요하다.

이 직렬 인버터의 장점으로는 종래의 인버터들보다 대전압 대전력에 적용이 아주 적절하며, 각 소자들은 주기 당 한 번 스위칭을 하고, 레벨의 수를 증가 함에 따라 거의 정현파 출력 전압에 근접하는 다층 계단파 출력전압을 만들 수 있다. 그리고 인버터의 구조는 많은 단상 인버터를 직렬연결로 구성하며 Full Bridge Inverter (FBI) 유니들은 독립된 직류 커패시터를 가지고 있으므로 각 전력소자의 전압대칭과 전압평형을 유지하기 위한 별도의 회로가 필요없다.

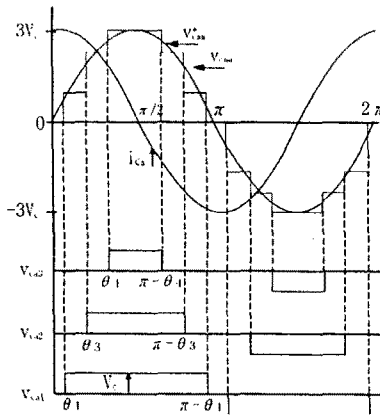


그림 27 레벨 직렬 인버터의 출력파형

4. SVC의 시스템 및 제어기법

A 보상원리

그림 3은 SVC를 직결전원에 접속한 경우의 단상등가 회로를 표현하고 있고, SVC의 출력전압이 이상적인 정현파전압 V_c 라고 가정하면 여기서 전원전압 V_s , R 과 L 은 등가저항과 임피던스이다.

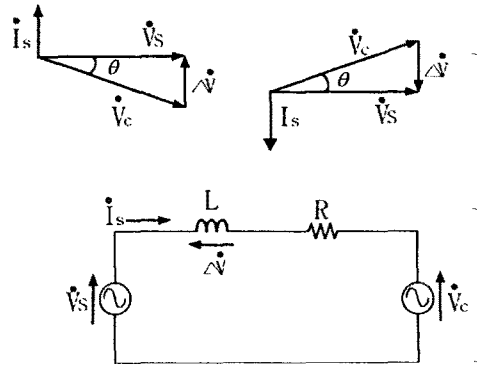


그림 3 (a)진상벡터도 (b)지상벡터도 (c) 단상등가 회로

전원측 V_s 와 V_c 의 위상차 θ 를 제어하여 무효전력의 발생량을 조절할 수 있다. 저항성분을 무시하고 전원전압 V_s , SVC 출력전압 V_c 와 전원전류 I_s 벡터도는 그림 3와 같다. $V_s > V_c$ 이면 지상무효전력이 $V_s < V_c$ 이면 진상무효전력이 발생하게된다. SVC 출력전압의 진폭은 직렬인버터의 변조물(MI)과 직류커패시터의 전압에 의해 결정된다. 본 논문에서는 구형파출력을 사용하고 있으므로 변조물의 제어는 불가능하고, θ 를 조정하여 직류 전압을 제어하여 SVC의 출력전압을 제어 할 수 있다.

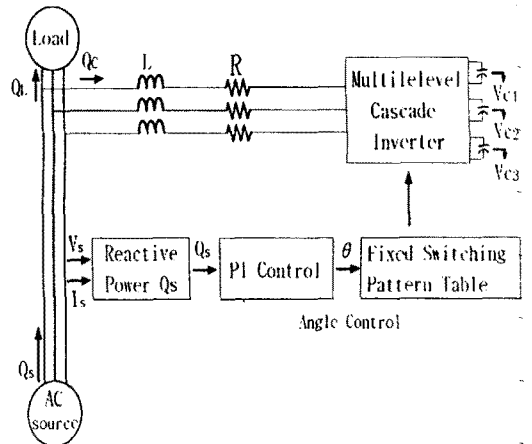


그림 4 직렬 인버터를 이용한 SVC의 시스템전체 블록도

B. 시스템 모델링 및 제어

그림 4는 새로운 직렬 인버터를 사용한 SVC의 시스템 도이고, 제안된 주회로에서 무효전력을 보상하는 직렬 인버터에서 3상 전력공급원이 이상적이라고 가정하면 공급전압 V_s 와 SVC의 출력전압 V_c 는 식 (1), (2), (3)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + 2\frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Ca} \\ V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} K V_c \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \theta) \\ \sin(\omega t - 2\frac{\pi}{3} - \theta) \\ \sin(\omega t + 2\frac{\pi}{3} - \theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} = (R+L \frac{di}{dt}) \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Ca} \\ V_{Cb} \\ V_{Cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서 $\sqrt{\frac{2}{3}} K$ 는 스위칭 함수의 변조지수(MI)이며, 식 (1), (2), (3)을 다음의 변환 행렬 S를 이용하여 3상-2상 변환하면 d-q축상의 변수로 변환된다.

$$S = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \theta) & \cos(\omega t + \theta - 2\frac{\pi}{3}) & \cos(\omega t + \theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \theta) & \sin(\omega t + \theta - 2\frac{\pi}{3}) & \sin(\omega t + \theta + 2\frac{\pi}{3}) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

위상각 $\theta(s)$ 에 대한 무효전력 $Q(s)$ 의 개루프 전달함수인 $Gq(s)$ 가 아래와 같이 얻어진다.[3]

$$Gq(s) = \frac{Q(s)}{\theta(s)} = \frac{N(s)}{D(s)} \quad (5)$$

여기서

$$N(s) = V_s^2 (LCs^2 + 2R_sCs + D^2)$$

$$D(s) = 2CL^2s^3 + 4LCR_s s^2 + [2C(R_s^2 + (\omega L)^2) + D^2L]s + D^2R_s$$

이다.

사용된 제어기는 그림 5와 같이 PI 제어기를 사용하여 전원전압과 동기를 맞추어 SVC의 출력전압 V_c 는 θ 를 조정하여 제어하였다. 여기서 독립된 커패시터, 즉 FBI의 각 유니트의 직류전압은 일정하게 충전된다고 가정한다.

4. 시뮬레이션 결과

제안된 직렬 인버터의 타당성을 검증하기 위하여 디지

탈시뮬레이션을 하였다. 사용된 시스템 파라메타는 다음과 같다.

$$L=5mH, C=2100\mu F, V_s=220V, R_s=1 \Omega$$

시뮬레이션에서 파형의 순서는 위부터 공급전원 A상 전압 V_{sa} , SVC의 A상의 출력전압 V_{ca} , 무효전력지령치 Q_{sref} , 무효전력량 Q_s 이고 Angle 값은 Alpha이다. 그림 6과 7은 정상상태의 무효전력의 기준값이 -10kVar와 10kVar의 파형들이다. 그림 8은 무효전력의 지령치를 "0"에서 10kVar로 변동하였을 경우의 과도응답 특성에 대하여 조사하였다. 그림 9는 무효전력의 지령치를 "0"에서 -10kVar의 급변시켰을 때 응답특성에 관한 파형들이다. 그림 8과 9에서와 같이 2주기 정도의 과도상태가 존재하나 양호한 응답특성을 얻을 수 있었으며, 무효전력은 지령치에 잘 추종하고 있음을 보여주고 있다.

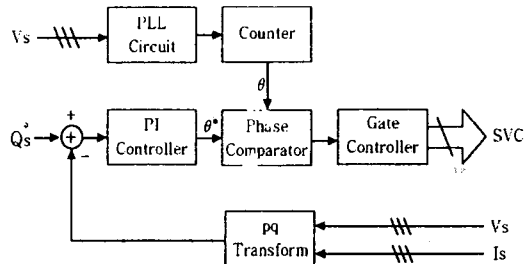


그림 5 SVC의 제어블록도

5. 결론

본 논문은 제안된 직렬 인버터를 사용한 10kVar SVC의 타당성을 검토하기 위하여 시뮬레이션을 통하여 과도응답특성을 검토하였다. 기존의 멀티레벨 인버터인 다이오드 크래핑방식과 프라임 커패시터방식의 단점인 커패시터의 해결할 수 있었으며, 스위칭손실 줄이기 위해 PWM제어를 하지 않고, 각 단상 FBI에 한 주기에 한번만 스위칭을 하였다. 제안된 새로운 멀티레벨 직렬 인버터는 FBI의 수를 증가함에 따라서 대용량 FACTS기기에 변압기없이 적용이 가능할 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. C.schauder et al., "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems," IEEE PES Summer Power Meeting, Paper No.94SM479-6PWRD, 1994.
2. L. H. Walker. "Force-commutated reactive power compensator," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22, no. 6, pp. 1091-1104, Nov./Dec. 1986.
3. Nam S. Choi, Cuk C. Choi, and Gyu H. Choi, "Modeling and analysis of a static var Compensator using multilevel voltage source inverter", IEEE/IAS'94 Annual Meeting, pp 946-953, 1994

4. F. Z. Peng, J. S. Lai, J. V. Coevering, "Multilevel voltage source converter system with balanced DC voltage", IEEE IAS'94 Annual Meeting, pp. 1144-1150, 1995.
5. D. A. Woodford and R. W. Menzies, "Controlling a Back-to-Back DC Link to Operate as a Phase Shift Transformer." paper no. 14-202, GIGRE 1994.
6. J. B. Ekanyake and N. Jenkins, "A Three-level Advanced Static Var Compensator." IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 11, no. 1 540-545 Jan. 1996.

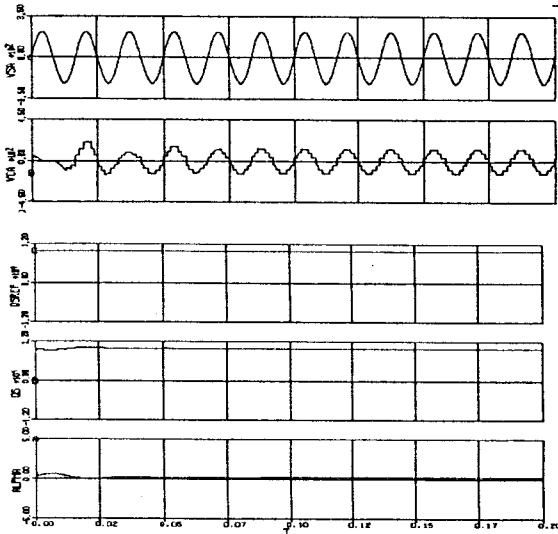


그림 6. 무효전력기준치를 10kVar의 정상상태

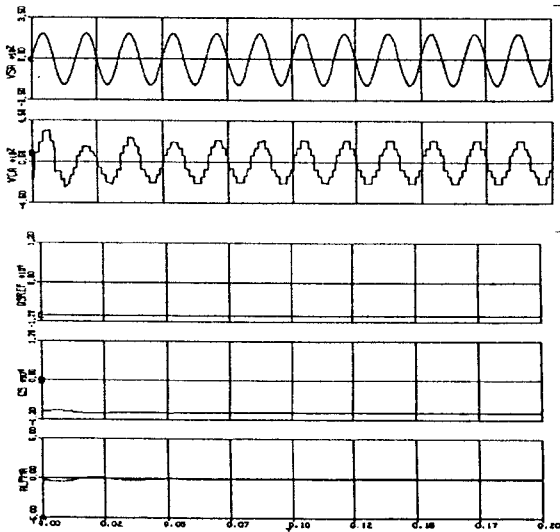


그림 7. 무효전력기준치를 -10kVar의 정상상태

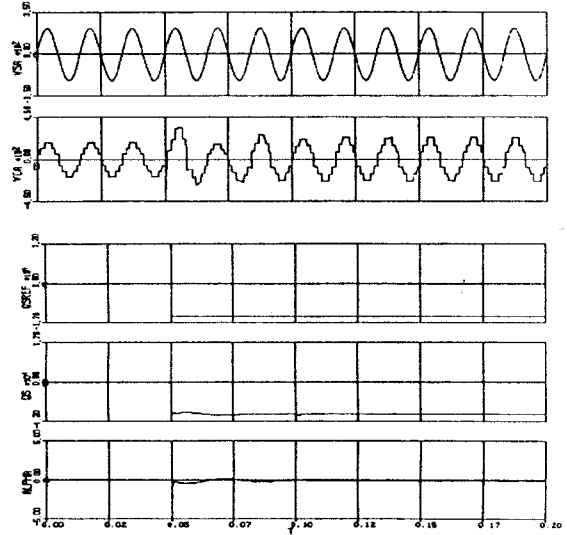


그림 8. 무효전력기준치 "0"에서 -10kVar로 스텝변동

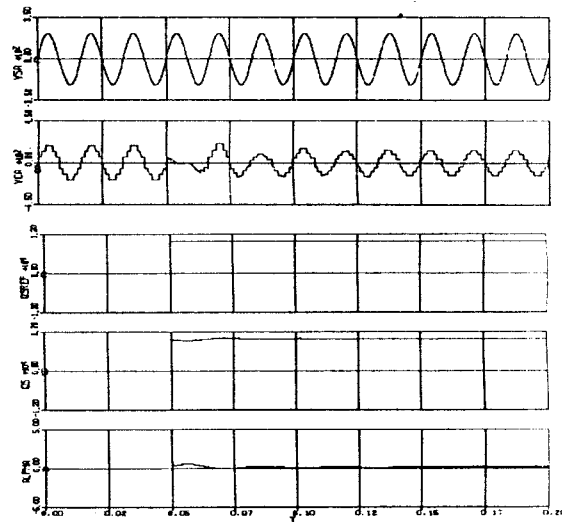


그림 9. 무효전력기준치 "0"에서 10kVar로 스텝변동