

공진형 콘버터를 이용한 직렬보상기와 병렬보상기의 비교 연구

정교범

홍익대학교 전기공학과

Comparison of HFLC Series Compensator and HFLC Shunt Compensator

Gyo-Bum Chung

Dept. of Electrical Engineering, Hongik University

Abstract

In this paper, a series compensator with a resonant LC circuit and a shunt compensator with the resonant circuit are compared based on the respective rating of its circuit elements. The ratings are calculated over a range of compensation and over a range of bus angle. The components ratings are expressed in a per unit values. The results of this study can be easily converted to actual MVA by a simple change in scale. The methodology presented to rate the various components within the system will help to determine the feasibility of various FACTS devices in costs.

1. 서론

전력 송전시스템의 유연성 개선을 위해서 Flexible AC Transmission Systems (FACTS)의 개념이 제안된 이후, 여러 가지 토플로지의 보상기가 제안되어져 왔다 [1,2]. 싸이리스터를 이용한 콘버터회로를 계통에 접속시킬 때, 무효전력의 공급이 충분하지 않으면, 운용에 문제점이 있어서, 해결방안으로서 공진회로의 고주파특성을 이용한 High Frequency Link Converter (HFLC)의 개념이 제안되었다 [3]. 또한, 전력용 반도체 기술의 발달로 다양한 출력제어 방식이 제안되었고, 특히 스위칭 손실을 줄이기 위해서 영전압 스위칭을 이용한 Pulse Density Modulation (PDM) 방식이 제안되었다 [4].

본 연구는 FACTS 개념의 경제성 평가를 위해, 공진형 직렬보상기와 병렬보상기의 운전상의 특성을 비교하여, 향후 FACTS기기 제작과 운용에 활용하고자 한다. 비교를 위해서, 각 보상기는 운전점에서 최소의 무효전력을 유지한다고 가정한다. 따라서, 설치된 보상기는 부하 변동 시에 보상비율 조절이 필요하고, 계통내의 고장 발생 시에는 발전기 동요에 의한 전력각 δ 가 변화하므로, 무효전력량의 조절이 필요하다. 따라서 운전점 변화에 의한 보상기의 각 구성 요소의 용량 변화를 비교하여, 그 특성에 의한 운전방안을 제안한다. 용량 계산을 위해서 P.U.법을 이용하여 본 연구 결과가 특별한 용량의 시스템에 한정되지 않도록 하였다.

2. 공진형 직렬보상기와 공진형 병렬보상기

그림 1은, 송전선에 연결되어 유효전력을 제어하는 공진형 직렬보상기를 보인다. 보상기는 스위칭 소자, 접속 변

압기, 공진회로, 제어회로, 보호장치 등으로 구성되어 있다. ΔV 는 요구된 보상비율에 따른 콘버터의 출력전압이다. 그림 2는 공진형 병렬보상기를 보인다. 병렬보상기는 직렬보상기와 똑같은 구성 요소로 되어있고, 두 보상기의 제어기는 송전선의 유효전력의 제어만을 고려한다면 구조적으로 일치한다. 각 보상기의 무효전력의 흐름은 공진회로의 저항분에 의한 손실과, 보상비율 변동에 의한 무효전력의 증감을 조절하기 위해서만 가능하다.

그림 3과 4는 각각의 출력전압 ΔV 에 의해 생성된 보상기의 출력단에서의 상전압이다. 일반적으로 보상비율이 작

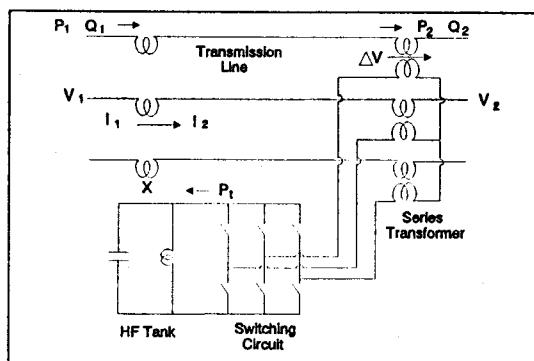


Fig. 1 HFLC series compensator connected to a transmission line

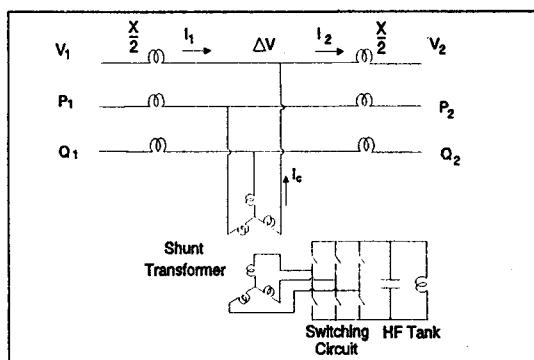


Fig. 2 HFLC shunt compensator connected to a transmission line

을 때, 직렬보상기의 내부의 공진회로는 보상 비율에 따라 정해진 공진 전압이 요구되나, 병렬 보상기는 보상 비율에 상관없이 송전선 레벨의 선간 전압에 준하는 높은 공진 전압이 요구된다. 출력 상전압에 의해 송전선으로 유입되는 고조파는 직렬보상기는 21°까지의 THD가 2.8%이나, 병렬보상기의 경우는 22.1%로, 고조파 제거를 위한 필터 없이는 송전선에 직접 연결할 수 없다. 그러나, 직렬보상기의 경우도 보상비율을 증가시키면 THD가 증가하여, 고조파 대책이 필요하다.

3. 보상기 구성 요소의 MVA 용량 계산

그림 1과 2의 송전시스템이 보상기 없이 운전될 때 전력방정식은 식 (1)과 같다.

$$P_{unc} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (1)$$

공진형 콘버터에 의해 송전선에 출력된 전압을 ΔV 라고 할 때, 직렬 보상기가 투입된 경우의 전력방정식은 식(2)와 같다.

$$P_{comp} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + \frac{V_1 \Delta V}{X} \cos \frac{\delta}{2} \quad (2)$$

또한 병렬보상기가 투입된 경우는 식 (3)과 같다.

$$P_{comp} = \frac{2V_1 \Delta V}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3)$$

송전시스템의 임의의 위상각 δ 에서, 직렬보상기와 병렬보상기의 비교 분석을 위해 공통으로 적용되는 보상 비율 k 를 식 (4)와 같이 정의한다.

$$k = \frac{\Delta P}{P + \Delta P} = \frac{P_{comp} - P_{unc}}{P_{comp}} \quad (4)$$

송전 시스템의 전력제어를 위한 공진형 콘버터는 주어진 운전 동작 점에서, 구성요소에서의 손실을 최소화하기 위해, 최소의 무효전력을 유지하도록 제어된다. 무효전력은 공진전압 $V_{tan k}$ 에 의해 결정되며, 출력전압 ΔV 와의 관계식은 다음과 같다 [2].

$$V_{tan k} \approx 2.5 \Delta V \quad (5)$$

V_b 는 정격 상전압, I_b 는 정격 선전류이다. $|V_1| = |V_2| = V_b$ 라고 가정하면, 전력각 δ 에서 보상비율 k 를 가질 때, 공진 전압 $V_{tan k}$ 와의 관계식은 직렬보상기의 경우는 식 (6), 병렬보상기의 경우는 식 (7)과 같다.

$$V_{tan k} = 5 V_b \frac{k}{1-k} \sqrt{2-2\cos \delta} \quad (6)$$

$$V_{tan k} = 1.25 V_b \frac{1}{1-k} \sqrt{2+2\cos \delta} \quad (7)$$

본 논문에서는, 공진형 콘버터의 구성요소 중에서 무효전력을 직접적으로 다투는 스위칭소자, 접속변압기, 공진회로의 MVA 용량을 계산한다. 직렬보상기의 경우는 I_{comp} 가 송전선의 선전류와 같으나, 병렬보상기의 경우는 식 (8)과 같다.

$$I_{comp} = 4I_b \frac{k}{(1-k)} \cos \frac{\delta}{2} \quad (8)$$

스위칭 소자는 4상한 동작을 위해 12개가 필요하며, 각각은 근사적으로 60[Hz]의 $\frac{1}{4}$ 주기동안 동작하므로, 스위치 전류 I_{sw} 는 $\frac{1}{2} I_{comp}$ 의 실효전류이다. 따라서 스위칭소자의 MVA용량은 식 (9)와 같다.

$$MVA_{sw} = 12 V_{tan k} I_{sw} \quad (9)$$

또한, $S_b = 3V_b I_b$ 라고 정의하면, 60 Hz 접속변압기의 용량은 직렬보상기는 식 (10), 병렬보상기는 식 (11)과 같이 계산한다.

$$MVA_{trans} = 34V I_{comp} = \frac{2k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) S_b \quad (10)$$

$$MVA_{trans} = 3\Delta V I_{comp} = \frac{2k}{(1-k)^2} (1 + \cos \delta) S_b \quad (11)$$

사용된 Capacitor는 높은 공진 주파수와 공진 전류에 영향을 받으나, Capacitor의 제작비용은 전압과 Capacitance 값에 주로 영향을 받으며, 계산하면 직렬보상기는 식 (12), 병렬보상기는 식 (13)과 같다.

$$MVA_{cap} = \frac{2.083}{X_{cap}} \frac{k^2}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) S_b \quad (12)$$

$$MVA_{cap} = \frac{0.521}{X_{cap}} \frac{1}{(1-k)^2} (1 + \cos \delta) S_b \quad (13)$$

여기서, X_{cap} 는 공진회로의 Capacitance 값을 60[Hz]의 P.U. Impedance로 환산한 값이다.

그림 5는 $\delta=5^\circ$ 에 대하여 보상비율 k 를 0%부터 80% 까지 변화시킬 때의 직렬보상기의 각 구성요소의 MVA 용량을, 그림 6은 병렬보상기의 MVA 용량을 보인다. 각각에서 스위칭 소자의 MVA용량이 가장 크게 나타났다.

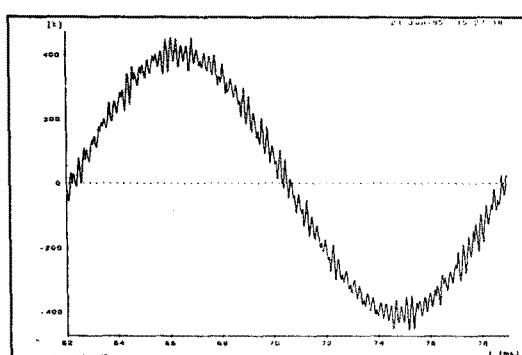


Fig. 3 The synthesized line voltage of the series compensator

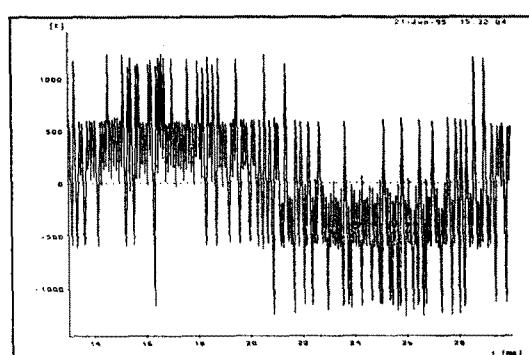


Fig. 4 The synthesized line voltage of the shunt compensator

그림 7은 보상비율 $k=0.2$ 에서 δ 를 0° 에서 180° 까지 변화시킬 때의 직렬보상기의 구성요소의 MVA 용량을 보인다. 그림 8에서 병렬보상기의 경우는 구성 요소의 MVA 용량은, δ 의 증가에 따라 감소함을 보인다. 그림 9에서 각 보상기 구성요소의 MVA 용량의 합을 비교하였다. 보상비율 k 가 커지면, 직렬보상기의 MVA 용량이 병렬보상기의 MVA 용량보다 커진다.

4. 결론

공진형 콘버터를 이용하여 직렬보상기와 병렬보상기를 구성할 때의 구성 요소에 필요한 MVA 용량을 임의의 위상각 δ 와 보상비율 k 에서 비교하였다. 무효전력만을 취급하는 두 보상기는 안정도 개선을 위해서 때로는 90° 보다 큰 위상각에서 운전되어져야 한다. 직렬보상기의 경우는

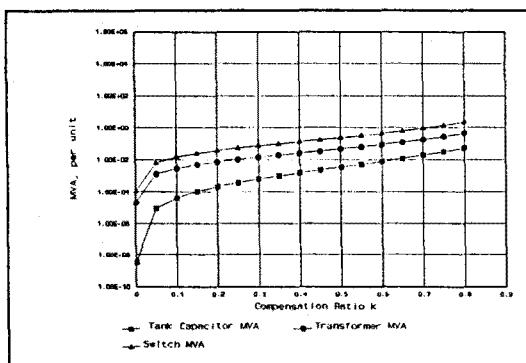


Fig. 5 MVA component ratings of the series compensator

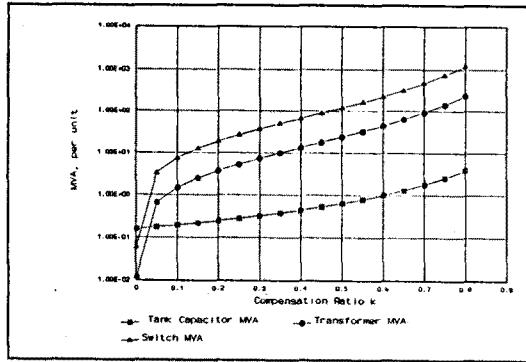


Fig. 6 MVA component ratings for the shunt compensator

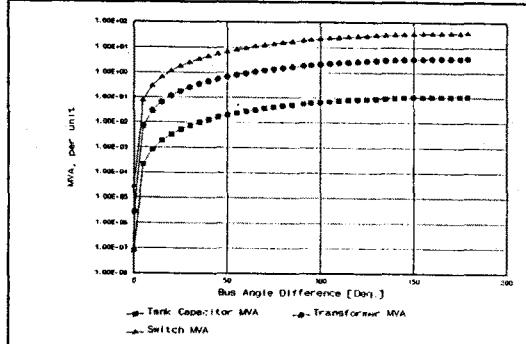


Fig. 7 MVA component ratings of the series compensator for bus angle

보상비율이 작을 때에도, δ 가 증가하면 보상기의 용량이 증가한다. 보상기의 MVA 용량이 증가하면, 보상기에 의한 저항 손실과 송전선으로의 고조파 유입이 증가한다. 그러나 병렬보상기의 경우는, 위상각이 증가하면, 보상기 MVA 용량이 감소한다.

본 논문에서 인용된 식은 전압원 인버터를 이용한 FACTS기기의 경제성 평가에 이용될 수 있으며, 직렬보상기와 병렬보상기가 조합된 위상변이기의 최적제어 알고리즘 개발에 이용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] L. Gyugyi, "Solid-State Control of AC Power Transmission," EPRI workshop on the Future in High Voltage Transmission, Cincinnati, Ohio, November 1990.
- [2] D.P. Carroll, K.D.T. Ngo, G.B. Chung, A. Maheshwari and S.B. Swindler, "High Frequency Link Converters As Elements in Flexible AC Transmission System," Final Report(Project RP4000-19) submitted to EPRI, University of Florida, January 1992.
- [3] P.M. Espelage and B.K. Bose, "High-Frequency Link Power Conversion," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 13, No.5, September/October 1977, pp. 387--394.
- [4] P.K. Sood and T.A. Lipo, "Power Conversion Distribution System Using a High Frequency AC Link," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 24, No.2, March/April 1988, pp. 288--300.

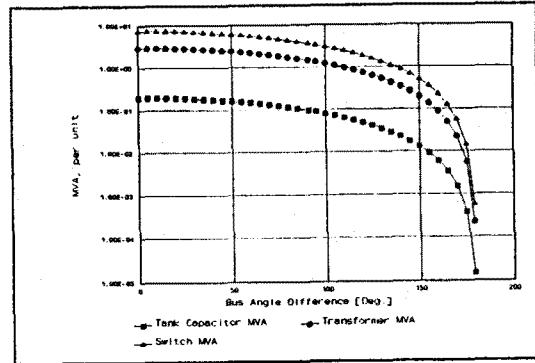


Fig. 8 MVA component ratings of the shunt compensator for bus angle

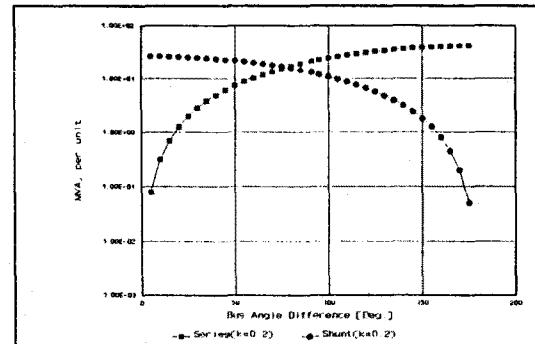


Fig. 9 Comparison of total MVA ratings of the series compensator and the shunt compensator