

SVPWM을 이용한 직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구

고영민, 채수용, 서영민, 정대택, 배영욱, 홍순찬
단국대학교 전기공학과

A Study on the Power Factor Improvement of DC Power Regenerating Systems Using SVPWM

Young-Min Ko, Soo-Yong Chae, Young-Min Seo, Dae-Taek Jeong,
Young-Wook Bae, and Soon-Chan Hong
Dept. of Electrical Eng., Dankook University

ABSTRACT

In the substations for traction systems and the large-scale discharging system of secondary batteries, the voltage of DC bus line goes up by the regenerated energy and the energy is usually wasted in resistor for system stability. This paper proposes the DC power regenerating system using a three phase PWM inverter. The proposed system can regenerate the excessive DC power from DC bus line to AC supply and control the power factor of AC supply to unity. To implement unity power factor, the magnitude of the inverter output voltage should be higher than that of AC supply and therefore SVPWM technique is adopted. Computer simulations are carried out to verify the validity of the proposed system.

1. 서 론

직류를 전원으로 하는 전철 시스템에서는 전동차의 제동시나 하강경사로 주행시 회생되는 에너지가 직류모선단의 전압을 상승시키고 이로 인해 시스템의 안정적인 동작을 저해하는 원인이 된다.^[1] 이를 방지하기 위해 저항을 통해 에너지를 소모하고 있는데, 이 방법은 발열과 저효율의 문제가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로 시스템에 인버터 회로를 기반으로 한 직류전력 회생회로를 설치하는 방법이 있다.

회생시 인버터 출력단 교류전압의 크기를 교류모선단 전압보다 크게하고 교류모선단에서 전류의 위상을 전압의 위상과 동상으로 제어하면 역률 제어를 달성할 수 있다.^[2]

본 논문에서는 직류를 전원으로 하는 시스템에서 3상 PWM 인버터를 기반으로 한 회생시스템을 대상으로 직류링크단의 전압상승을 억제하면서 인버터 출력단 전압의 크기와 교류모선단의 전류위상을 제어하여 교류모선단으로 회생되는 전력을 단위 역률에 가깝게 제어할 수 있는 역률제어 알고리즘을 제안하고 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 입증하고자 한다.

2. 직류전력 회생시스템

그림 1은 본 논문에서 제안한 직류전력 회생시스템의 개념도이다. 직류모선단에서 발생된 에너지로 인해 직류링크단 전

압이 상승하게 된다. 직류링크단 전압이 설정전압 이상으로 상승하면 회생용 인버터회로가 동작하여 직류링크단의 전압 상승을 억제하면서 에너지가 연계리액터를 통해 교류모선으로 회생된다.

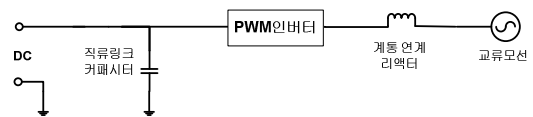


그림 1 직류전력 회생시스템
Fig. 1 DC power regenerating system

직류전력 회생시스템에서 교류모선단으로 에너지가 회생됨에 따라 직류모선단의 전압이 감소한다. 이때 회생용 인버터의 출력전압은 교류모선단의 전압보다 큰 크기로 제어되어야 무효 전력을 제거할 수 있다.^[2] 이를 위하여 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)방식을 사용한다.

3. SVPWM

PWM 인버터를 사용할 경우 구형파 인버터에 비해 고조파 함유율이 적어서 고조파제거 필터의 크기가 작아진다. PWM 인버터의 대표적인 방식에는 SPWM(Sinusoidal PWM)방식과 SVPWM방식이 있다. 그림 2는 3상 존재함수에 따른 공간전압 벡터도이다.

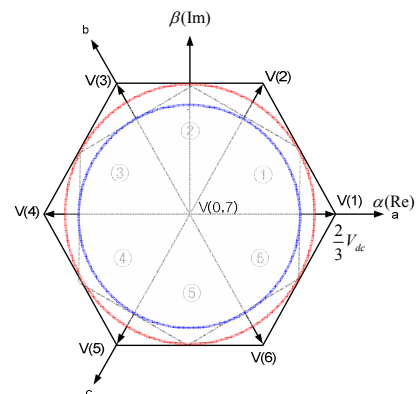


그림 2 3상 존재함수에 따른 공간전압 벡터
Fig. 2 Space voltage vector by three phase existence function

그림에서 6각형의 바깥쪽 내접원은 SVPWM방식의 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 상전압 크기로서 그 크기는 직류링크 전압의 57.7%($1/\sqrt{3}$)이고 안쪽 내접원은 SPWM방식의 선형적으로 출력이 가능한 인버터의 최대 상전압 크기로서 그 크기는 직류링크 전압의 50%(1/2)이다. 이와 같이 SVPWM방식에서 전압의 크기변조지수가 SPWM방식에 비해 크다. 전압의 크기변조지수가 크면 같은 크기의 직류링크 전압을 가지고 인버터의 출력전압을 더 크게 만들 수 있고 그로 인해 역률을 높이는데 유리하여 본 시스템에서는 SVPWM방식을 이용한다.

4. 역률 개선

회생용 인버터 시스템에서 e_{ab} , e_{bc} , e_{ca} 가 교류모선단의 선간전압이고 i_{as} , i_{bs} , i_{cs} 가 교류모선단의 선전류라고 하자. 인버터 출력단 전압은 상전압을 기준으로 제어됨으로 이를 고려하여 d-q변환하면 식 (1)이 된다. 식 (2)는 선전류의 d-q변환식이다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta + \frac{\pi}{6}) & \cos(\theta - \frac{\pi}{2}) & \cos(\theta - \frac{7\pi}{6}) \\ -\sin(\theta + \frac{\pi}{6}) & -\sin(\theta - \frac{\pi}{2}) & -\sin(\theta - \frac{7\pi}{6}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{bc} \\ e_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

유효전력과 무효전력은 다음과 같다.^[3]

$$P_{AC} = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \quad (3)$$

$$Q_{AC} = \frac{3}{2}(e_d i_q - e_q i_d) \quad (4)$$

여기서 i_q 와 e_q 를 0으로 제어하면 무효전력이 0이 되어 단위역률로 제어할 수 있다. 역률은 식 (5)와 같다.

$$PF = \frac{P_{AC}}{\sqrt{P_{AC}^2 + Q_{AC}^2}} \quad (5)$$

그림 3은 유효전력과 무효전력 연산부이다.

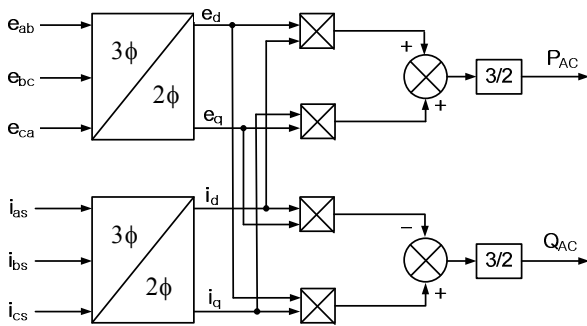


그림 3 유효전력 및 무효전력 연산부
Fig. 3 Operation part for active and reactive power

5. 제어 알고리즘

회생용 인버터 시스템에서 무효분 전류인 q축 전류를 0으로 제어하기 때문에 유효분 전류인 d축 전류를 제어하여 직류링크 단 전압을 제어한다. d축 전류지령치는 직류링크단 전압을 일정하게 유지하기 위하여 직류링크단 전압의 오차에 대한 PI제어기로 구성한다. d축 전류지령치는 다음과 같다.

$$i_d^* = (K_{1p} + \frac{K_{1i}}{s})(V_{dc}^* - V_{dc}) \quad (6)$$

그림 4는 인버터의 등가회로이다. 이를 통하여 인버터 시스템의 전압관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= -L \frac{di_{as}}{dt} + V_{as} \\ e_{bs} &= -L \frac{di_{bs}}{dt} + V_{bs} \\ e_{cs} &= -L \frac{di_{cs}}{dt} + V_{cs} \end{aligned} \quad (7)$$

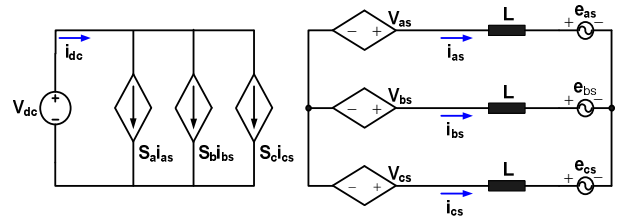


그림 4 인버터의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of inverter

식 (7)을 $\alpha-\beta$ 변환하면 식 (8)과 식 (9)가 되고 식 (8)과 식 (9)를 d-q변환한 후 d축과 q축 전류제어식으로 정리하면 식 (10)과 식 (11)이 된다.

$$e_\alpha = -L \frac{di_\alpha}{dt} + V_\alpha \quad (8)$$

$$e_\beta = -L \frac{di_\beta}{dt} + V_\beta \quad (9)$$

$$L \frac{di_d}{dt} = V_d - \omega L i_q - e_d \quad (10)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = V_q + \omega L i_d - e_q \quad (11)$$

식 (10)의 d축 제어식에는 q축의 간섭분인 $-\omega L i_q$ 성분이 존재하고 식 (11)의 q축의 전류제어식에는 d축의 간섭분인 $\omega L i_d$ 성분이 존재하므로 인버터의 출력전압 지령치 V_d^* 와 V_q^* 는 간섭분을 미리 보상해주는 정역률제어로 구성한다. 인버터의 출력전압 지령치는 다음과 같다.

$$V_d^* = e_d + \omega L i_q + (K_{2p} + \frac{K_{2i}}{s})(i_d^* - i_d) \quad (12)$$

$$V_q^* = e_q - \omega L i_d + (K_{3p} + \frac{K_{3i}}{s})(i_q^* - i_q) \quad (13)$$

그림 5는 전압 및 전류 제어 블록도이다.

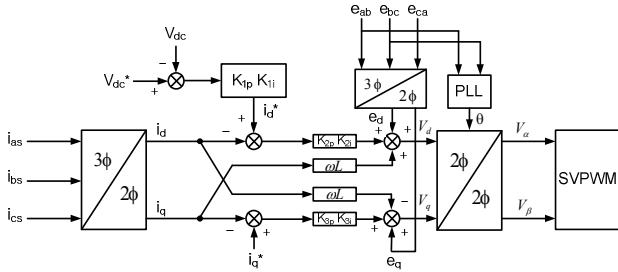


그림 5 전압 및 전류 제어 블록도
Fig. 5 Block diagram of voltage and current control

그림 5에서 i_q^* 를 0으로 설정하여 i_q 를 0으로 제어하며 선간 전압 e_{ab} , e_{bc} , e_{ca} 를 가지고 d-q 변환시 e_d 를 0으로 만들어 주어 무효전력을 0으로 제어한다. 또한 d-q 변환시 동일한 위상 값을 고려해 주어 i_q 와 e_q 가 0이 되면 상전압과 상전류가 동상이 된다.

6. 시뮬레이션

제한한 제어기법의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 SVPWM 인버터의 시뮬레이션 파라미터이다.

표 1 SVPWM 인버터의 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters of SVPWM inverter

교류모선단 선간전압	3상 220V	직류링크전압 설정값	320V
직류링크 커패시터	1880μF	연계리액터	3.6mH

그림 6은 시뮬레이션 회로도이다. 초기입력전류를 5A로 인가한 후 250ms에서 입력전류를 10A로 변동하였으며 초기 커패시터전압을 311V로 설정하였다. 그림 7은 직류링크 커패시터 양단 전압파형이다. 초기 과도상태와 입력전류 변동구간을 제외한 나머지 구간에서 직류링크단 전압이 설정값을 추종하는 것을 알 수 있다. 그림 8은 유효전력 및 무효전력 파형이다. 무효전력이 0에 가깝게 제어되는 것을 확인할 수 있고 유효전력이 입력전류 변동 후에 입력전류에 비례하여 증가한 것을 알 수 있다. 그림 9는 역률이며 역률이 1에 가깝게 제어되는 것을 알 수 있다.

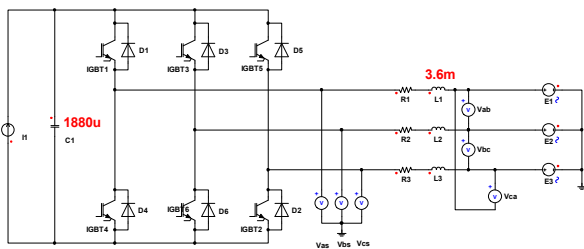


그림 6 시뮬레이션 회로도
Fig. 6 Simulation circuit

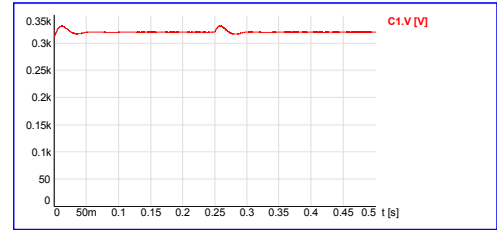


그림 7 직류링크 커패시터 양단 전압
Fig. 7 Voltage across DC LINK capacitor

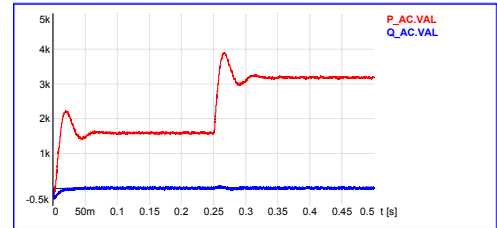


그림 8 유효전력 및 무효전력
Fig. 8 Active power and reactive power

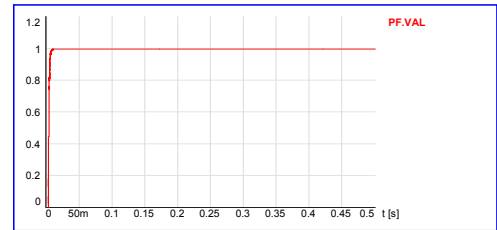


그림 9 역률
Fig. 9 Power factor

7. 결론

본 논문은 직류를 전원으로 하는 시스템에서 직류모선단의 에너지를 교류모선단으로 회생하는 경우에 근사 단위역률을 달성할 수 있는 제어기법을 제안하였다. SVPWM방식을 사용하여 회생시스템을 구현하였으며 역률을 개선할 수 있는 제어알고리즘을 제시하였다. 시뮬레이션을 통하여 무효전력이 0에 가깝게 제어되어 역률이 단위역률에 가깝게 제어되는 것을 확인하였다. 또한 입력이 가변되어도 직류링크단 전압이 일정하게 유지됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 정우창, 강경우, 서영민, 홍순찬, "SHE방식을 적용한 직류 전력 회생시스템의 고조파 저감에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제9권, 제1호, pp. 58~64, 2004. 2.
- [2] 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬, "직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제5호, pp. 410~415, 2001. 10.
- [3] 송의호, 전진홍, 조동길, 전형환, 김학만, "EMTDC를 이용한 UPFC Simulation", 전력전자학회 논문지, 제6권, 제3호, pp. 291~298, 2001. 6.