

직접전력변환 방식을 이용한 전압 sag/swell 보상기의 구현

차한주, 이대동
충남대학교 전기공학과

Implementation of Voltage Sag/Swell Compensator Using Direct Power Conversion Method

Han-ju Cha, Dae-dong Lee
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - In this paper, a new single phase voltage sag/swell compensator using direct power conversion is introduced. A new compensator consists of input/output filter, series transformer and direct ac-ac converter, which is a single-phase back-to-back PWM converter without dc-link capacitors. Advantages of the proposed compensator include: simple power circuit by eliminating dc-link electrolytic capacitors and thereby, improved reliability and increased life time of the entire compensator; simple PWM strategy to compensate voltage sag/swell at the same time and reduced switching losses in the ac-ac converter. Further, the proposed scheme is able to adopt simple switch commutation method without requiring complex four-step commutation method commonly required in the direct power conversion. Simulation results are shown to demonstrate the advantages of the new compensator and PWM strategy.

1. 서 론

전압 sag/swell은 한 주기부터 수초 동안의 사용자측 전압의 감소 또는 증가를 의미하며 일반적으로 기기 고장의 원인이 되지는 않지만 중요 부하들의 동작을 방해한다.

전력품질조사에 따르면 전압 sag와 swell은 전압왜곡의 주요 원인으로 장비 오동작을 야기하며 특히 연속공정분야에서의 생산성 손실과 고장시간 증가를 가져온다.

전압 sag/swell 보상 방법은 현재까지 발표된 대부분이 에너지 저장요소를 필요로 하는 정류기/인버터 구조를 채택하였으며, 그것은 가격상승과 부피증가의 문제가 있었다.[1]-[4]

2002년에 처음으로 에너지 저장요소가 필요 없는 직접전력변환개념을 채택한 전력변환장치가 발표되었지만 단지 전압 sag와 swell 중 한 가지만 보상할 수 있었다.[5]

본 논문에서는 직접전력변환을 이용한 새로운 단상 전압 sag/swell 보상기를 제안하였다.

이 새로운 보상기는 입/출력 필터, 직렬연결 변압기, dc-link 캐패시터가 필요 없는 단상 back-to-back PWM 컨버터인 직접 방식 ac-ac 컨버터로 구성되어 있다.

제안된 보상기의 장점은 dc-link 전해 캐패시터를 제거함으로써 간단한 전력회로 알고리즘을 실현하였으며 이에 따른 전체 보상기의 수명증가, 신뢰성을 향상시킴과 동시에 전압 sag/swell을 보상하였다.

아울러 직접방식 ac-ac 컨버터 정류기단에서는 스위치가 매 반주기마다 동작하므로 스위칭 손실이 대폭 감소하며 일반적인 직접 전력변환 방식에서 필요한 복잡한 4-step 전류방식이 필요 없다.

시뮬레이션을 통하여 제안된 보상기의 장점을 검증하였으며 DSP 컨트롤러를 탑재한 직접방식 PWM ac-ac 컨버터가 현재 제작되어지고 있다.

2. 제안된 직접전력 sag/swell 보상기

2.1 제안된 보상기 동작원리

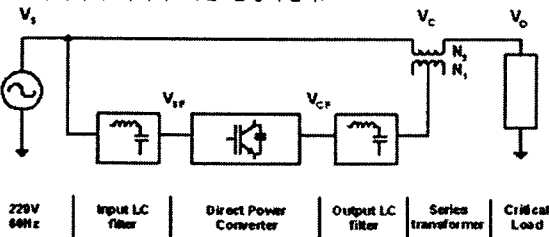
그림 1은 단상 전압 sag/swell 보상기의 블록 다이어그램을 보여준다. 이것은 입력 LC 필터, 직접전력변환기, 출력 LC필터와 직렬연결 변압기로 구성되어 있다.

전원단에서 발생한 전압 sag는 직접전력변환기의 출력전압 V_c 와 전원전압인 V_s 를 더하여 보상되며, V_c 는 전원단의 정격전압 V_{RATE} 와 V_s 의 차이에 해당된다.

따라서 부하전압 V_o 는 V_s 에서의 전압 sag 발생과 관계없이 정격전압 V_{RATE} 를 계속해서 유지한다.

동일한 원리를 적용하여 전압 swell 왜곡은 V_s 와 180도의 위상차가 있는 전압 V_c 를 더하는 것으로써 보상하며 보상기는 V_s 로부터 V_c 를 제거하여 V_o 를 정격전압으로 유지한다.

V_s 에서 전압 sag/swell이 나타났을 때 보상기는 부하전압 V_o 를 V_{RATE} 로 계속해서 유지하기 위해서 V_c 를 발생시킨다.



<그림 1> 제안된 전압 sag/swell 보상기

2.2 직접전력변환회로

제안된 직접전력변환기의 구조는 dc-link 캐패시터가 없는 단상 back-to-back 컨버터이다.[6],[7]

이것은 정류기단 $R_1 - R_2$ 와 인버터단 $T_1 - T_4$ 로 구성되어져 있다. 전압 sag 또는 swell과 같은 전압 왜곡이 일어나는 동안 정류기단 스위치들은 전원의 매 반주기마다 한 번씩 정류한다.

따라서 정류기는 양방향성 전파 정류기로 동작하고 dc-link 전압은 전파 정류된 전압과형이 된다.

V_s 의 양의 반 주기 동안 스위치 $R_1 - R_2$ 쌍은 턴 온 되어지고, 스위치 $R_3 - R_4$ 쌍은 V_s 의 음의 반 주기 동안 턴 온 되어진다.

인버터단은 정류된 dc-link 전압을 조평함으로써 요구된 크기의 교류전압을 발생하며 출력 LC필터에 의해 V_c 를 생성한다.

표 1은 인버터단에서 전압 sag와 swell 발생시 각각 동작하는 인버터단 턴 온 스위치 쌍을 나타낸다.

<표 1> 인버터단 턴 온 스위치 쌍

| Polarity of V_s | interval | Voltage sag | Voltage swell |
|---------------------|----------|----------------|----------------|
| Positive half cycle | D | $T_1 - T_2$ on | $T_3 - T_4$ on |
| | D' | $T_1 - T_3$ on | $T_2 - T_4$ on |
| Negative half cycle | D | $T_2 - T_4$ on | $T_1 - T_3$ on |
| | D' | $T_2 - T_1$ on | $T_3 - T_2$ on |

표 1에서 온 듀티 D의 값은 식(4)와 (7)에 의해 표현되며 D'는 1-D이며 오프-듀티를 나타낸다.

예를 들면 $V_s > 0$ 이며 전압 sag가 발생하면 인버터 스위치 $T_1 - T_2$ 쌍은 온 듀티 D동안 턴 온 되고, $T_1 - T_3$ 쌍은 D' (=1-D)동안 턴 온 되어진다.

2.3 PWM 알고리즘

2.3.1 전압 sag 경우

부하전압을 나타내는 수식은

$$V_o = V_s + V_c \tag{1}$$

여기서 V_s 는 전원전압이고 V_c 는 직접전력 보상기에 의해 얻어진 보상전압이며 중요부하에 요구되어진 부하전압 V_o 는 220V의 정격전압 V_{RATE} 으로 나타낸다.

따라서 V_o 의 값은 V_{RATE} 와 같다. 그러나, 전압 sag가 일어나는 동안 전원전압 V_s 는 감소하며 V_{RATE} 보다 작아진다.

$$V_s = (1-k)V_{RATE} \tag{2}$$

여기서 k는 전압 sag의 크기를 나타내고 단위는 pu이다. sag 조건에서 V_c 는 V_s 를 더해줌으로써 V_o 와 V_{RATE} 를 같게 만든다.

따라서 V_c 는 전원전압 V_s 의 함수가 된다. 직접전력변환기의 온 듀티 D와 직렬연결 변압기의 턴비 $n (=N_2/N_1=1)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$V_c = nDV_s = DV_s \frac{N_2}{N_1} \tag{3}$$

V_o 와 V_{RATE} 를 같게 유지하기 위해 D는 식 (1),(2)와 (3)의 결합하여 다음과 같이 구해진다.

$$V_o = (1-k)V_{ref} + D(1-k)V_{ref} \frac{N_2}{N_1}$$

$$D = \frac{k}{1-k} \frac{N_1}{N_2} \tag{4}$$

예를 들면 전압 sag가 50%가 될 때 보상전압 $V_c=0.5V_s$ 와 같은 주기 D=1로 작용한다.

2.3.2 전압 swell 경우

위의 전압 sag와 마찬가지로 부하전압 V_o 는 V_s 와 V_c 의 합이다. 전압 swell이 일어나는 동안 V_s 는 증가하므로

$$V_s = (1+k)V_{ref} \quad (5)$$

여기서 k 는 전압 swell의 크기를 나타내고 단위는 pu이다. swell의 조건에서 V_c 는 V_s 와 180도의 위상차가 나고 V_s 로부터 제거되어진 V_o 는 V_{RATE} 와 같게 만들어진다. 그 V_c 는 전원전압 V_s 의 함수관계이고 보상기의 주기를, 직렬 연결된 변압기의 턴 비 $n(=1)$ 의 관계는 아래와 같이 쓰여 진다.

$$V_c = -nDV_s = -DV_s \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

여기서 V_o 는 V_{RATE} 를 유지하여야 하고 D 는 식 (1),(6)과 (7)의 결합으로 계산되어진다.

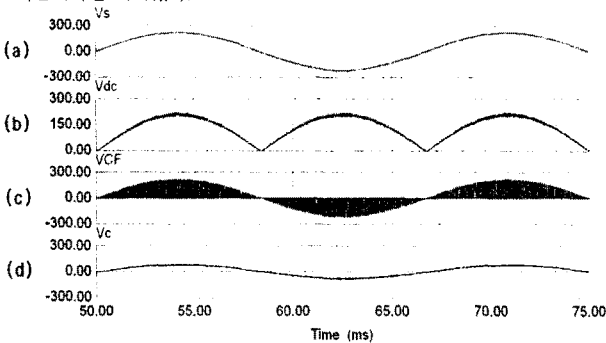
$$V_o = (1+k)V_{ref} - D(1+k)V_{ref} \frac{N_2}{N_1}$$

$$D = \frac{k}{1+k} \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

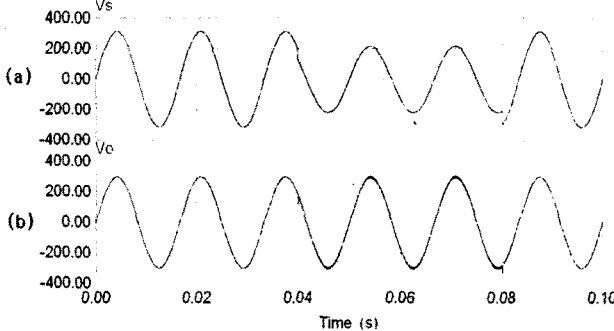
전압 swell이 50%가 될 때 보상전압 $V_c=0.5V_s$ 와 같고 주기 D 는 0.33으로 작동한다.

3. 시뮬레이션

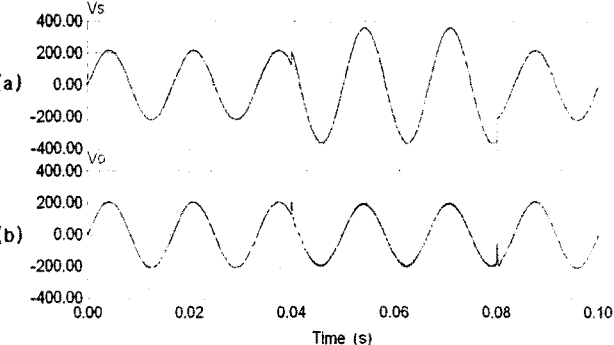
제안되어진 전력회로 구조와 PWM 기술의 결합으로 얻어진 이점을 설명하기 위한 그림 1의 시스템은 2kW의 선간부하와 220V, 60Hz의 전원소스로 시뮬레이션 되어졌다.



〈그림 2〉 (a)전원전압 V_s 의 sag가 30%일 때의 파형
(b)전파 정류된 dc-link 전압 V_{dc}
(c)출력 LC필터 전의 직접전력변환기의 출력전압 V_{CF}
(d)보상전압 V_c



〈그림 3〉 (a)40~80msec 동안의 30% sag된 V_s
(b)보상되어진 출력전압 V_o



〈그림 4〉 (a)40~80msec 동안의 30% swell된 V_s
(b)보상되어진 출력전압 V_o

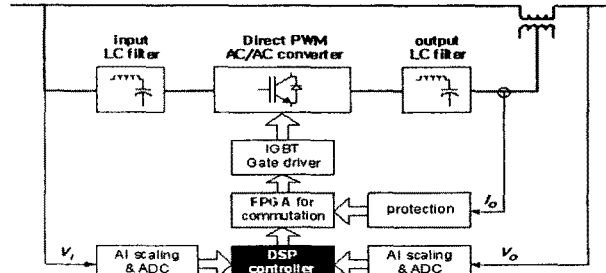
그림 2(a)는 전원전압 V_s 의 sag($k=0.3$)가 30%일 때의 파형을 보여주고 그림 2(b)는 전파 정류된 dc-link 전압 V_{dc} 를 보여준다. 그림 2(c)는 출력 LC필터 전의 직접전력변환기의 출력전압 V_{CF} 를 보여준다.

고 여기에서 주기 D 는 30% sag 조건에서는 0.43이 된다.

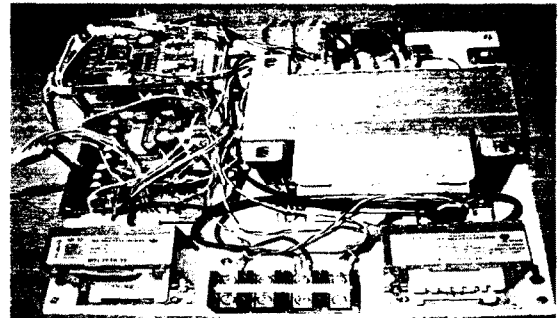
그림 2(d)는 보상전압 V_c 의 결과이고 그것은 V_s 와 같고 k 는 0.3pu이다. 그것에 의하여 부하전압 V_o 는 전압 sag와 관계없이 전압크기는 V_{RATE} 로 된다. 그림 3(a)는 기기능상 30%의 전압 sag($k=0.3, D=0.43$)의 분포를 보여주고 그림 3(b)는 보상되어진 출력전압 V_o 를 보여준다. 그것의 크기는 전압 sag와 관계없이 V_{RATE} 와 같다. 그림 4(a)는 기기능상 30%의 전압 swell($k=0.3, D=0.23$)의 분포를 보여주고 그림 4(b)는 보상되어진 출력전압 V_o 를 보여준다. 그것의 크기는 전압 swell과 관계없이 V_{RATE} 와 같다.

4. 실험결과

이론적 분석과 시뮬레이션을 입증하기 위한 220V, 3kVA 직접전력 보상기는 현재 충남대학교 전력전자 연구실에서 제작 중이다.



〈그림 5〉 직접전력보상기의 블록 다이어그램



〈그림 6〉 직접전력보상기의 구조

그림 5와 그림 6은 직접전력 보상기의 블록 다이어그램과 구조이다. 이 구조는 TMS320F2407을 이용한 DSP(Digital Signal Processor)보드와 8개의 IGBT 정류와 보호를 위한 FPGA(filed-programmable gate array)보드, 파워보드는 정류기 브리지, 인버터 브리지, 전압과 전류센서로 구성되어 있다.

5. 결론

본 논문에서는 직접전력변환을 이용한 새로운 단상 전압 sag/swell 보상기를 증명하였다.

이 제안된 보상기는 전압 sag뿐만 아니라 swell 발생시에도 중요부하단의 전압을 정적전압으로 유지함을 보여주고 있다.

더욱이 제안된 PWM 방법과 직접전력변환기는 대용량의 dc-link 캐패시터를 제거함으로써 신뢰성 향상과 보상기의 수명증가, 정류기단의 줄어든 스위칭 손실 감소의 장점이 있다.

제안된 보상기는 3상 직접전력보상기로도 쉽게 확장될 수 있을 것이다.

[참고 문헌]

- [1] J.L. Duran-Gomez, P.N. Enjeti, and A. von Jouanne, "An approach to achieve ride-through of an adjustable speed drive with fly-back converter modules powered by super capacitors," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, vol. 3, 1999, pp. 1623-1629
- [2] J. L. Duran-Gomez, P. N. Enjeti, and B. O. Woo, "Effect of voltage sags on adjustable speed drives- A critical valuation and an approach to improve its performance," IEEE Trans. Applications, vol. 35, Nov/Dec. 1999, pp.1440-1449
- [3] A. Kara, P. Dahler, D. Amhof, and H. Gruning, "Power supply quality improvement with a dynamic voltage restorer(DVR)," in Proc. IEEE APEC'98, vol. 2, 1998, pp. 986-993.
- [4] N. H. Woodley, L. Morgan, and A. Sundaram, "Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 14, pp. 1181-1186
- [5] E. C. Aeloiza, P. N. Enjeti, L. A. Moran, O. C. Montero-Hernandez, and S. Kim, "Analysis and design of a new voltage sag compensator for critical loads in electrical power distribution systems," IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 39, July/Aug. 2003, pp. 1143-1150
- [6] S. Kim, S. K. Sul and T. A. Lipo, "AC/AC power conversion based on matrix converter topology with unidirectional switches," IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 36, No. 1, 2000, pp. 139-145
- [7] C. Klumpner and F. Blaabjerg, "Modulation method for a multiple drive system based on a two-stage direct power conversion topology with reduced input current ripple," IEEE Trans. on Power Elec., vol.20, July, 2005, pp. 922-929