

직접전력변환 방식을 이용한 새로운 전압 sag/swell 보상기

차한주, 이대동
충남대학교

New Voltage Sag/Swell Compensator Using Direct Power Conversion Method

Han-ju Cha, Dae-dong Lee
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.

전압 sag의 크기는 정격전압의 85% 아래로 떨어지면 15%의 sag가 발생한다고 정의하며 동일한 정의를 전압 swell 크기에도 적용한다.[1],[2]

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.[3]-[6]

2002년에 처음으로 에너지 저장요소가 필요 없는 직접전력변환개념을 채택한 전력변환장치가 발표되었지만 단지 전압 sag와 swell 중 한 가지만 보상할 수 있었다.[7] 본 논문에서는 직접전력변환을 이용한 새로운 단상 전압 sag/swell 보상기를 제안하였다.

이 새로운 보상기는 임/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 직접 방식 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 검증하였

으며 DSP 컨터롤러를 탑재한 직접 방식 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 LC 필터와 직렬연결 변압기로 구성되어 있다.

전원단에서 발생한 전압 sag는 직접전력변환기의 출력 전압 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 부하 전압 V_O 를 V_{RATE} 로 계속해서 유지하기 위해서 V_C 를 발생시킨다.

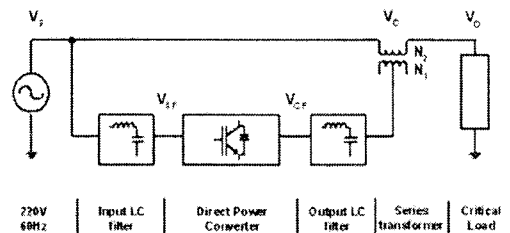


그림 1. 제안된 전압 sag/swell 보상기

2.2 직접전력변환회로

제안된 직접전력변환기의 구조는 dc-link 캐패시터가 없는 단상 back-to-back 컨버터이다.[8],[9]

이것은 정류기단 R_1 - R_4 와 인버터단 T_1 - T_4 로 구성되어 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 전압파형이 된다.

V_S 의 양의 반 주기 동안 스위치 R_1 - R_2 쌍은 턴 온 되

어지고, 스위치 R_3 - R_4 쌍은 V_S 의 음의 반 주기 동안 턴 온 되어진다.

인버터단은 정류된 dc-link 전압을 초평함으로써 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_3 - T_4 on	T_1 - T_2 on
Negative half cycle	D	T_3 - T_4 on	T_1 - T_2 on
	D'	T_1 - T_2 on	T_3 - T_4 on

표 1에서 온 듀티 D 의 값은 식(4)와 (7)에 의해 표현되며 D 는 $1-D$ 이며 오프-듀티를 나타낸다.

예를 들면 $V_S > 0$ 이며 전압 sag가 발생하면 인버터 스위치 T_1 - T_2 쌍은 온 듀티 D 동안 턴 온 되고, T_3 - T_4 쌍은 $D'(=1-D)$ 동안 턴 온 되어진다.

2.3 PWM 알고리즘

A. 전압 sag 경우

부하전압을 나타내는 수식은

$$V_O = V_S + V_C \quad (1)$$

여기서 V_S 는 전원전압이고 V_C 는 직접전력 보상에 의해 얻어진 보상전압이며 중요부하에 요구되었던 부하 전압 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.

$$V_S = (1-k)V_{RATE} \quad (2)$$

여기서 k 는 전압 sag의 크기를 나타내고 단위는 pu이다. 그림 2의 벡터 다이어그램은 sag된 V_S , 직접전력보상 출력전압 V_C , 정격전압 V_{RATE} 로부터 얻어진 보상된 부하전압 V_O 를 나타낸다.

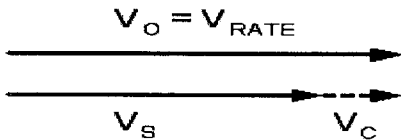


그림 2. 전압 sag시 전압 벡터들($k=0.3$)

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 D 와 직렬연결 변압기의 턴 비 $n(=N_2/N_1=1)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$V_C = nDV_S = DV_S \frac{N_2}{N_1} \quad (3)$$

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

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

$$D = \frac{k}{1-k} \frac{N_1}{N_2} \quad (4)$$

예를 들면 전압 sag가 50%가 될 때 보상전압 $V_C = 0.5V_S$ 와 같고 주기 $D=1$ 로 작동한다.

B. 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.

그림 3의 벡터 다이어그램은 swell된 V_S , 직접전력보상 출력전압 V_C , 정격전압 V_{RATE} 로부터 얻어진 보상된 부하전압 V_O 를 나타낸다.

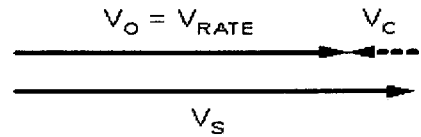


그림 3. 전압 swell시 전압 벡터들($k=0.2$)

swell의 조건에서 V_C 는 V_S 와 180도의 위상차가 나고 V_S 로부터 제거되었던 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 쓰여진다.

$$V_C = -nDV_S = -DV_S \frac{N_2}{N_1} \quad (6)$$

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 4(a)는 전원전압 V_S 의 sag($k=0.3$)가 30%일 때의 파형을 보여주고 그림 4(b)는 전과 정류된 dc-link 전압 V_{dc} 를 보여준다.

그림 4(c)는 출력 LC필터 전의 직접전력변환기의 출력 전압 V_{CF} 를 보여주고 여기에서 주기 D 는 30% sag 조건에서는 0.43이 된다.

그림 4(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 5(a)는 기기능급상의 30%의 전압 sag($k=0.3$, $D=0.43$)의 분포를 보여주고 그림 5(b)는 보상되어진 출력 전압 V_O 를 보여준다. 그것의 크기는 전압 sag와 관계없이 V_{RATE} 와 같다.

그림 6(a)는 기기능급상의 30%의 전압 swell($k=0.3$, $D=0.23$)의 분포를 보여주고 그림 6(b)는 보상되어진 출력 전압 V_O 를 보여준다. 그것의 크기는 전압 swell과 관계없이 V_{RATE} 와 같다.

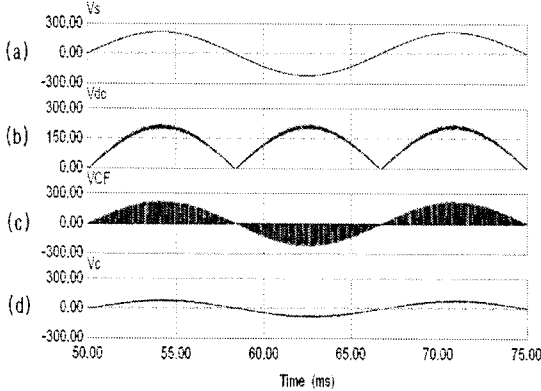


그림 4. (a)전원전압 V_S 의 sag가 30%일 때의 파형
(b)전파 정류된 dc-link 전압 V_{dc}
(c)출력 LC필터 전의 직접전력변환기의 출력전압 V_{CF}
(d)보상전압 V_C

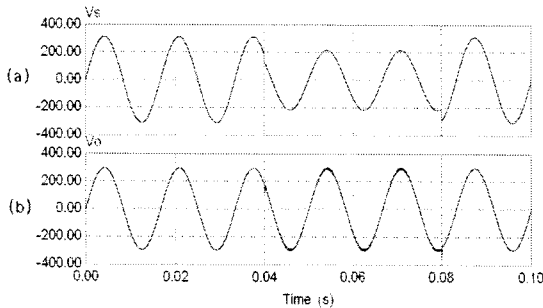


그림 5. (a)40~80msec 동안의 30% sag된 V_S
(b)보상되어진 출력전압 V_O

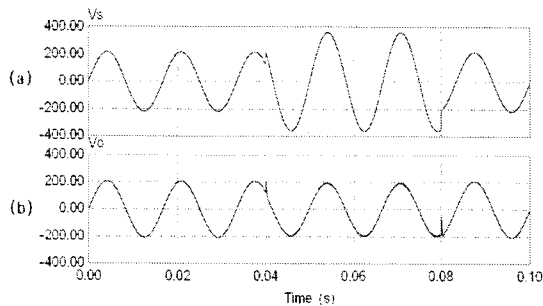


그림 6. (a)40~80msec 동안의 30% swell된 V_S
(b)보상되어진 출력전압 V_O

4. 실험결과

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

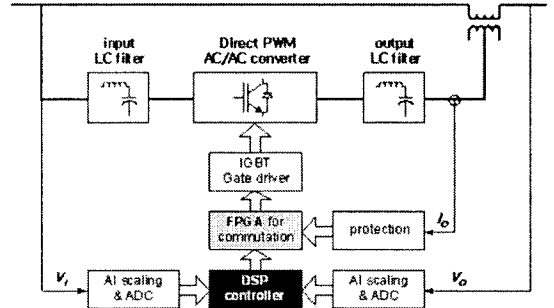


그림 7. 직접전력보상기의 블록 다이어그램

그림 7은 직접전력 보상기의 블록 다이어그램이다. 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. 결 론

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

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

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

제안한 보상기는 3상 직접전력보상기로도 쉽게 확장될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] D. Sabin, "An assessment of distribution system power quality," Elect. Power Res. Inst., Palo Alto, CA EPRI Final Rep. TR-106294-V2, vol.2, Statistical summary report, May 1996
- [2] M. H. J. Bollen, "Understanding power quality problems - voltage sages and interruption," ISBN 0-7803-4713-7, IEEE Press, 2000
- [3] 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
- [4] J. L. Duran-Gomez, P. N. Enjeti, and B. O. Woo, "Effect of voltage saga 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
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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