http://dx.doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.4.322

전 영역의 전압보상을 위한 단상 직렬형 Quasi Z-소스 전압 Sag-Swell 보상기

엄준현[1], 정영국†, 임영철[1]

Single-Phase Series Type Quasi Z-Source Voltage Sag-Swell Compensator for Voltage Compensation of Entire Region

Jun-Hyun Eom[1], Young-Gook Jung†, and Young-Cheol Lim[1]

Abstract - Conventional single-phase series quasi Z-source voltage compensator can not compensate for voltage sag less than 50% that frequently occurs in the industrial field. In this study, single-phase series quasi Z-source voltage sag-swell compensator which can compensate the voltage variation of entire range is proposed. The proposed system is composed of two quasi Z-source AC-AC converters connected in series with output terminal stage. Voltage sag less than 50% could be compensated by the intersection switching control of the upper converter duty ratio and of the upper converter duty ratio. Also the compensation voltage and its flowchart for each compensation mode are presented for entire sag-swell region. To confirm the validity of the proposed system, a DSP(DSP28335) controlled experimental system was manufactured. As a result, the proposed system could compensate for the voltage sag/swell of 20% and 60%. Finally, voltage compensation factor and THD(Total Harmonic Distortion) according to voltage variation and load change were measured, and voltage quality shows a good results.

Keywords: voltage sag/swell compensation, entire compensation region, quasi Z-source AC-AC converter, series connection of output terminal, intersection switching control, voltage compensation factor, THD

1. 서 론

급속한 경제 발전과 국민 생활수준의 향상으로 전력용 반도체 소자를 사용한 기기들이 가정용, 사무용, 산업용에 널리 이용되고 있으며, 에너지 절약 및 기기의 성능 향상에 기여하고 있다. 이러한 전력용 반도체 소자를 이용한 기기들은 마이크로 프로세서를 이용한 제어 장치나 전력전자 기술을 응용한 기기들을 내장하게 되어 공급되는 전력 품질에 매우 민감하다. 아울러 이러한 부하들이 자동화 장치를 통해 커다란 전력망으로 연결되어 있어서 부하 시스템 전체가 전력 품질에 매우 민감하게 되었다[1,2].

전력 품질에 영향은 끼치는 원인으로는 다음의 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 전력의 공급 신뢰성에 영향을 주는 정전이고, 두 번째는 공급되는 전력의 질을 저하시키는 고조파(harmonics), 순간 전압 상승(voltage swell), 순간 전압 강하(voltage sag), 전압 또는 전류의 불평형(unbalance), 전압변동과 플리커(voltage fluctuation / flicker) 그리고 전압 노치(voltage notch) 등이 있다[3,4]. 전력 전자 기술을 이용한 대부분의 전력 변환 장치들의 스위칭 동작이 과도 상태에서의 전압 노치나 정상 상태의 전압 고조파를 발생시키는 원인이 되고 있다.

일반적으로 전력 품질을 저하시키는 여러 문제들 중에서 가장 빈도가 높으며, 민감한 부하를 가지고 있는 수용가에 많은 영향을 주고 있는 것이 순간적인 전압 상승(voltage swell)과 전압 강하(voltage sag)이라 말할 수 있다. 순간 전압 상승은 전압 크기가 공칭 전압의

Paper number: TKPE-2013-18-4-4 ISSN: 1229-2214
† Corresponding author: jyg@db.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Daebul University
Tel: +82-61-469-1263 Fax: +82-61-469-1353
[1] Dept. of Electrical Engineering, Chonnam Nat'l Univ.
Manuscript received Dec. 24, 2012; accepted Mar. 29, 2013

1.1~1.8p.u이고 지속 시간이 0.5~30cycles동안 공급 전압의 크기가 증가하는 것이다. 또한 순간 전압 강하는 전압 크기가 공칭 전압의 0.1~0.9p.u이고 지속 시간이 0.5~30cycles 동안 공급 전압의 크기가 감소하는 것으로 이들은 인접한 배전 선로에서의 사고 발생이 그 원인이다[5]. 이러한 순간 전압 상승과 순간 전압 강하는 자동화 장치 등의 오동작이나 작업정지 등의 문제를 유발하여 경제적으로 큰 손실을 일으키게 된다.

이러한 순간 전압 상승과 순간 전압 강하의 문제를 해결하기 위한 대표적인 전력전자 기기로는 DC-AC 인버터 구조의 일반적인 전압sag-swell보상기가 있다. 일반적인 전압sag-swell 보상기는 유효 전력을 다루기 때문에 별도 에너지 저장장치(energy storage system : ESS)를 필요로 한다[6-9]. 에너지 저장장치로는 커패시터, 배터리 등이 있으나 소비 전력이 증가하게 되면 에너지 저장장치의 크기도 증가하게 되고, 결국에는 시스템의 비용이 증가하는 문제점이 발생된다[10]. 이를 해결하기 위하여 단상 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터 구조의 동적 전압 보상기[11-12]가 제안되었다. 이 방법은 정상 전압에 대하여 0.5~0.65p.u, 즉 50~65%의 전압 sag 보상과 전 영역의 전압 swell은 보상이 가능하다. 그러나 산업 현장에서 가장 빈번히 발생하는 0.1~0.5[p.u]범위의 순간 전압sag[13]에 대하여 단상 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터 구조의 동적 전압 보상기[11-12]로는 보상이 불가능하다는 문제점이 있다.

본 연구에서는 2대의 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터를 이용하여 모든 영역의 전압 sag-swell 보상이 가능한 단상 직렬형 전압sag-swell 보상기를 제안하였다. 제안된 시스템은 연속 전류 모드(CCM)으로 동작하며, 상위 컨버터 듀티비 sa_D와 하위 컨버터 sb_D를 교차로 제어하는 기법에 따라 동상과 역상의 buck-boost모드 전압을 발생할 수 있다. 전원 전압 vi의 변동 상태에 따라 Sag Mode-1, Sag Mode-2, Sag Mode-3 그리고 Swell Mode로 나누고 각 모드 별로 보상 순서도를 제시하였다. 이를 통하여 각 모드에 대한 릴레이(relay)의 온/오프와 상위/하위 컨버터의 듀티 비 D를 제어 하였다.

제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 DSP (DSP28335)로 제어되는 실험 시스템을 제작하였다. 그 결과, 전원전압 vi의 변동에 대하여 각 모드별로 제어되어 구해진 듀티비 D에 의하여 50%미만의 전압 sag를 보상 가능하였다. 따라서 제안된 시스템은 전 영역에서 발생되는 전압 sag-swell을 보상할 수 있고, 보상 후의 전압에 대한 총고조파 왜형률(THD)과 보상률(compensation factor)을 검토하여 보상 성능을 파악하였다.

2. 제안된 시스템

2.1 구성 및 원리

그림 1은 본 연구의 제안된 시스템을 나타내고 있다. 전원전압 vi의 전압 변동이 없는 경우, 릴레이-1 (Ry1)은 오프 상태고, 릴레이-2 (Ry2)는 온 상태에 있다. 만약 전원전압 vi에 전압 변동이 발생하면, Ry1은 온 상태가 되고, Ry2는 오프 상태가 되며, 제안된 시스템은 보상 동작을 한다.

출력 측이 직렬 연결된 2대의 Quasi Z-소스 AC-AC 컨버터는 상위 컨버터와 하위 컨버터에 각각 $R_s - C_s$ 스너버를 포함하는 저압의 양방향 전력용 스위치 IGBT(Sa1,Sb1 및 Sa2,Sb2)를 사용하고 있다. 또한 스위치의 온, 오프 상태에 따라 교류 보상 에너지의 저장과 방출이 이루어지는 Quasi Z-소스 네트워크, 출력 L-C필터, 컨버터들의 보상전압을 부하 측으로 주입하기 위한 결합 변압기로 구성되어져 있다. 제안된 시스템은 전원전압 vi에 전압 변동이 발생하게 되면, 2개의 릴레이가 서로 반대로 온/오프를 하며 동시에 상위 컨버터와 하위 컨버터에 적절한 듀티비 값이 계산되어 보상 전압을 출력한다.

그림 2는 제안된 시스템의 기본적인 PWM 듀티 비의 제어 원리이다. T는 스위칭의 한 주기를 나타내며, 이 한 주기 T동안 Sa1, Sb1은 Sa2, Sb2와 상보적으로 온, 오프를 반복하고 있다. 즉 Z-소스 컨버터의 동작 영역중 상위 컨버터와 하위 컨버터의 Sa1, Sb1이 (1-D)T만큼 온 되는 동안에 Z-소스 컨버터는 active mode로 동작하

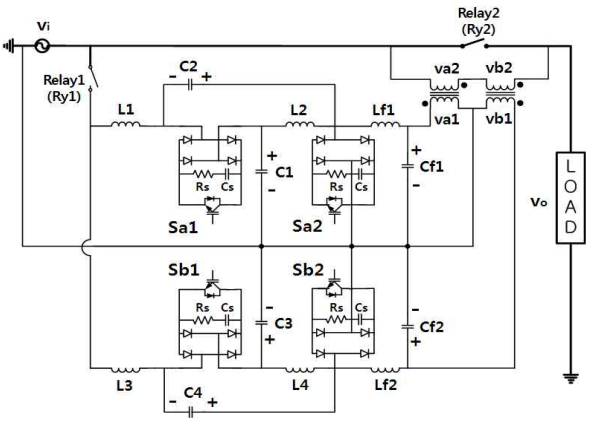


Fig. 1 The proposed system

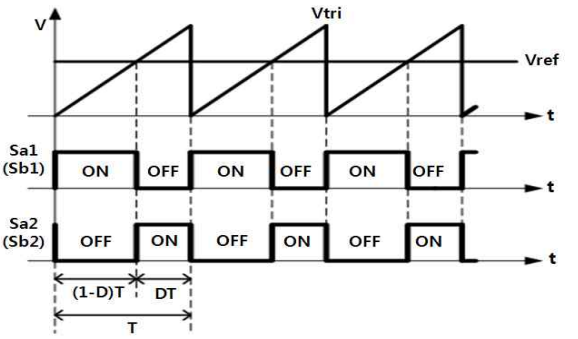


Fig. 2. Standard PWM duty ratio control

고, 상위 컨버터와 하위 컨버터의 Sa2, Sb2가 DT만큼 온되는 동안에 Z-소스 컨버터는 shoot through mode 상태가 된다. 그러나 그림 2의 기본적인 PWM 듀티 비의 제어만으로는 동상의 벅 모드 출력을 할 수 없으므로, 50% 미만의 전압 Sag를 보상할 수 없다. 그림 3은 이를 해결하기 위한 교차 스위칭 PWM 듀티비 제어를 나타내고 있다. 교차 스위칭 제어를 통하여 2대의 컨버터 중에서 상위 컨버터의 Sa1, Sa2는 동상의 부스트 모드로 동작하도록 스위칭을 하며, 하위 컨버터의 Sb1, Sb2는 역상의 벅 모드로 동작하도록 스위칭을 한다. 상위 컨버터의 스위칭 손실을 줄이기 위하여, 상위 컨버터의 듀티비 D를 D=0으로 고정하여 active mode상태의 Sa1이 (1-D)T(D=0)만큼 온이 되고, shoot through mode 상태의 Sa2는 DT(D=0)이 되므로 스위칭을 하지 않으므로, 결과적으로 입력 전압과 출력 전압은 동상이 된다. 그리고 하위 컨버터는 역상의 벅 모드로 동작이 되도록 active mode상태의 Sb1이 (1-D)T만큼 온이 되고, shoot through mode 상태의 Sa2가 DT만큼 온이 되도록 듀티비 D를 적절히 조절한다.

제안된 제어를 통하여 상위 컨버터와 하위 컨버터의 출력은 결합변압기를 통하여 50% 미만의 전압 sag의 보상전압을 출력할 수 있다.

그림 4와 그림 5는 $v(i) > 0$, 50%이하의 전압sag 발생에 대한 제안된 시스템의 active mode와 shoot through mode의 회로 동작을 나타내고 있다. active mode 상태에서 Sa1과 Sb1이 (1-D)T만큼 온 되는 동안 vc1과 vc3에 걸리는 전압 만큼 vcf1, vcf2에 전압이 출력되어 이를 제안된 시스템에서 이용하게 되고, shoot through mode 상태에서는 회로 전류가 Sa2와 Sb2를 통하여 DT만큼 방전하는 상태가 된다.

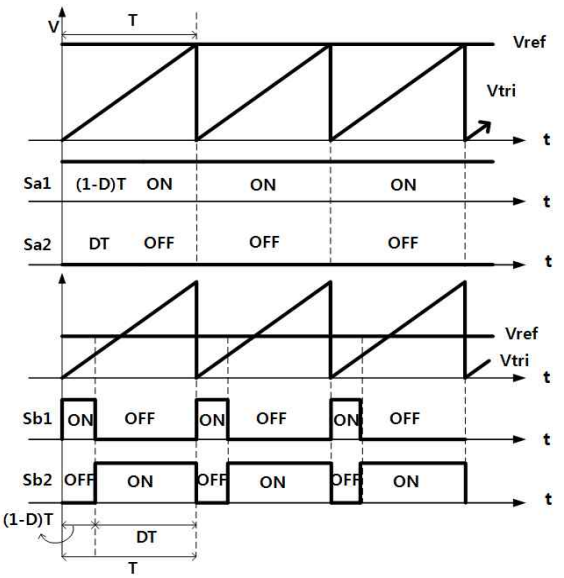


Fig. 3 PWM duty ratio control by the intersection switching method

2.2 전압변동 검출과 보상 동작모드

전원전압 vi의 변동에 대하여 전압sag와 전압swell의 보상영역으로 나누어지고, 제안된 시스템에 의하여 보상전력을 출력할 수 있다. 제안된 시스템에서 50%미만의 전압sag 보상방법은 Sag Mode-1, 50~65% 전압sag 보상방법은 Sag Mode-2, 66~75.5% 전압 sag 보상방법은 Sag Mode-3, 100% 전압swell 보상방법은 Swell Mode로 나눌 수 있다.

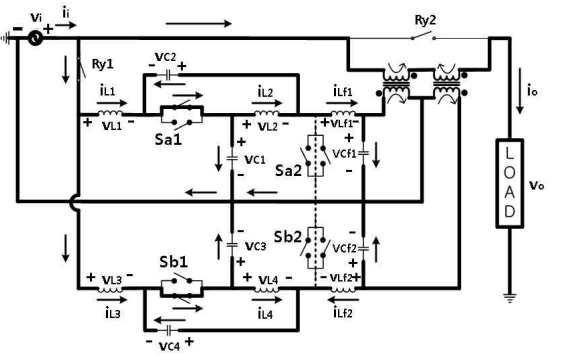


Fig. 4 Circuit operation of the active mode(50% under voltage sag, $v(i) > 0$

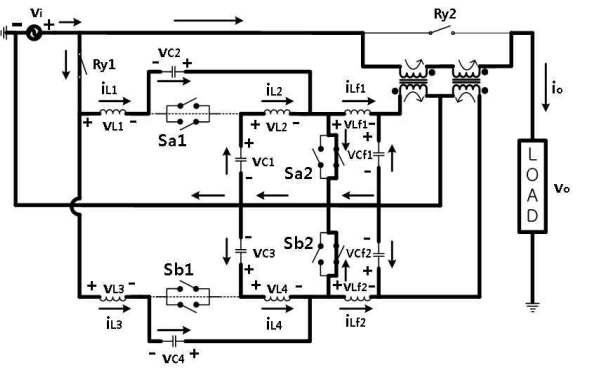


Fig. 5 Circuit operation of the shoot through mode(50% under voltage sag, $v(i) > 0$

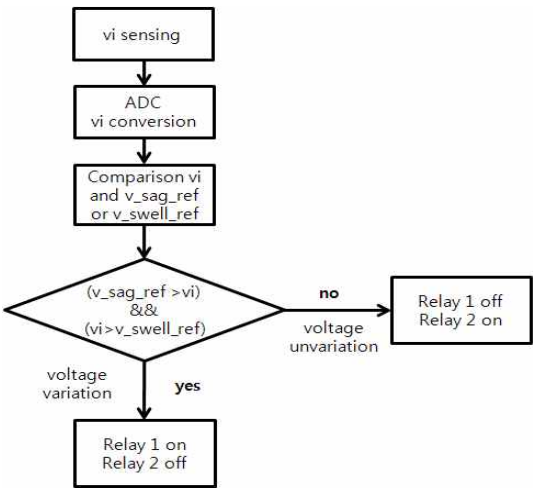


Fig. 6 Flow chart of relay control

그림 6은 제안된 시스템의 전원전압 vi의 변동에 의한 릴레이 제어 순서도를 나타낸다. 피크치 검출법에 의해 읽어 들인 전원전압 vi의 전압변동 상황을 기준전압 vref와 비교하며 항상 감지하고 있다. 만약 전압변동이 발생하여 기준전압 vref의 0.1~0.9p.u와 1.1~1.8p.u영역에 들어오게 되면, 제안된 시스템의 Ry1은 온상태가 되고, Ry2는 오프가 된다. 전압변동이 없는 경우에는 Ry1이 오프상태이고, Ry2는 온 상태를 유지한다. v_sag_ref는 기준전압 vref의 0.9p.u값이고, v_swell_ref은 기준전압 vref의 1.1p.u값이다. 즉, 전원 전압 vi의 전압변동 상황은 v_sag_ref와 v_swell_ref의 범위를 벗어나는지에 벗어나지 않는지에 대하여 판별하게 된다.

그림 7은 전압변동 발생 시 보상영역 판별 순서도를 나타낸다. 기준 전압 vref와 전원전압 vi은 비교가 되어 vi이 vref/2 보다 작으면 50% 미만의 전압 sag로 판단하고, vi이 기준 전압 vref보다 작고 vref/2의 전압 보다 크거나 같으면 50% 이상의 전압 sag로 판단한다. 그리고 vi이 vref의 전압 보다 크거나 같으면 전압 swell로 판단한다.

2.2.1 Sag Mode-1

제안된 시스템 역시 50%미만의 전압 sag가 발생하였을때 기존의 상보적으로 온, 오프를 하는 기본적인 PWM 듀티 비의 제어로는 필요한 보상전압 즉, 전원전압 vi와 동상의 50%미만의 전압을 출력할 수 없다. 그러나 그림 4-6으로 나타낸 상위 컨버터와 하위 컨버터의 교차 스위칭 제어에 의해 이 문제를 해결할 수 있다.

그림 8은 전압sag 보상영역의 50%미만에 대한 Sag Mode-1의 스위칭 모드를 나타낸다. 전원전압 vi에 전압 sag가 발생하게 되면, 부하에 동상의 보상 전압이 필요하게 된다. 제안된 시스템은 전압 변동이 발생하는 동안 릴레이-1(Ry1)이 온상태가 되고, 릴레이-2(Ry2)는 오프가 되어 전원전압 vi와 동상인 보상 전압을 출력하게 된다.

제안된 시스템의 스위칭 스트레스를 최소화하기 하기 위하여, 상위 컨버터의 출력 전압 va1은 듀티 비 sa_D=0인 조건에서 전압 vi와 동상의 같은 값을 가지는 전압을 va1에 발생하며 이것을 식(1)로 구할 수 있다. 그리고 하위 컨버터의 출력 전압 vb1은 식 (3)에 의해 구할 수 있다. 구해진 출력 전압 vb1은 식 (5)에 의해 듀티 비 sb_D를 구하면 역상 전압인 vb1이 발생된다. 즉, 상위 컨버터에서 발생된 전원 전압과 동상인 출력 전압 va1과 하위 컨버터에서 발생된 역상인 출력 전압 vb1을 서로 합한 (va1+vb1)은 결합 변압기를 거치면 최종적인 보상 전압 v_{sag1}=(va2+vb2)이 발생된다
이상에 대한 수식은 다음으로 나타내진다.

$$v_{a1}+v_{b1}=v_{a2}+v_{b2}=v_{sag1}=v_{ref}-vi \quad (1)$$

$$v_{b1}=v_{ref}-vi-v_{a1} \quad (2)$$

상위 컨버터의 D를 0으로 고정하면, 다음을 얻게 된다.

$$v_{b1}=v_{ref}-2vi \quad (3)$$

$$\frac{1-sb_D}{1-2sb_D}v_i=v_{ref}-2vi \quad (4)$$

$$sb_D=\frac{v_{ref}-3v_i}{2v_{ref}-5v_i} \quad (5)$$

그림 9는 Sag Mode-1의 보상 순서도이다. 전압 검출 결과 50%미만의 전압 sag로 판단되는 경우, 기준 전압 vref에서 전압 sag가 발생된 전원전압 vi를 빼면 보상전압 v_sag1을 전압을 얻을 수 있다. 보상전압 v_sag1이 0보다 크고 vref/2보다 낮으면 50%미만 전압으로 판단되어 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비 sa_D, sb_D를 계산하게 된다. 하지만 그렇지 않은 경우에는 다시 전압 sag인지 전압 swell인지를 판단하는 처음 단계로 돌아간다.

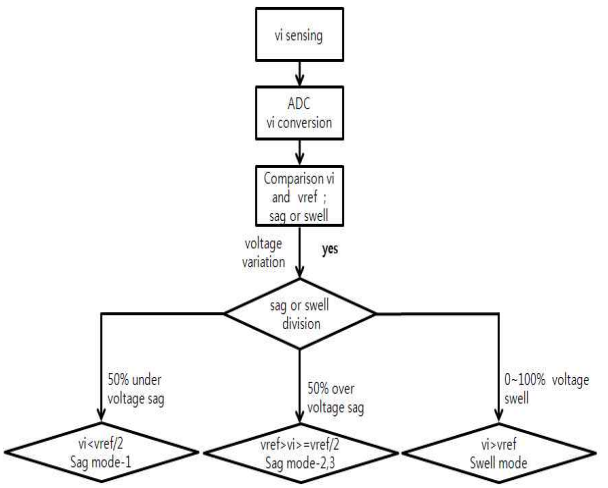


Fig. 7 Flow chart of compensation region distinction

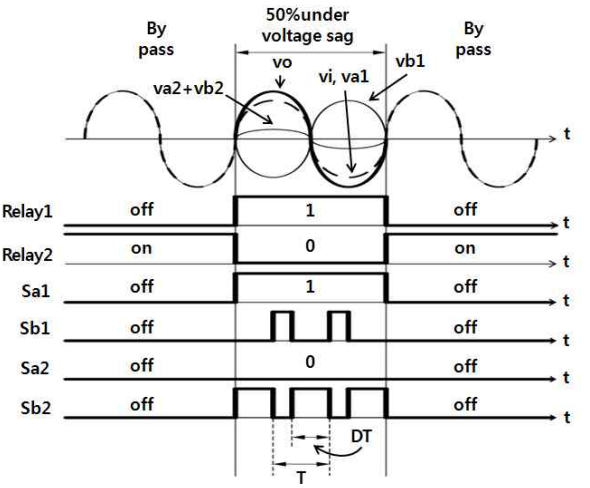


Fig. 8 Switching mode of Sag Mode-1

2.2.2 Sag Mode-2

그림 10은 전압sag 보상영역의 50~65% 전압 sag에 대한 Sag Mode-2의 스위칭 모드를 나타낸다. Sag Mode-2 역시 부하에 동상의 보상전압이 필요하게 되고, 전압변동이 발생하는 동안 제안된 시스템은 Ry1이 온 상태가 되고, Ry2는 오프가 되어 전원 전압 vi와 동상인 보상 전압을 발생한다. 상위와 하위 2대의 컨버터를 이용하여 식 (6)으로 동상의 보상 전압v_{sag2}을 얻을 수 있다. 상위 컨버터의 출력 전압 va1은 식 (7)에 의해 기준 전압 v_{ref}가 발생하도록 구하면 식 (8)의 듀티 비 sa_D가 결정된다. 그리고 하위 컨버터의 출력 전압 vb1은 식 (9)로 구해지며, 식 (10)의 듀티 비 sb_D로 스위칭하면 역상 전압인 vb1가 얻어진다. 이로써 상위 컨버터에는 동상인 출력 전압 va1과 하위 컨버터에는 역상인 출력 전압 vb1을 서로 합한 (va1+vb1)이 보상 전압 v_{sag2} =(va2+vb2)으로 나타난 다.

$$v_{a1} + v_{b1} = v_{sag2} \tag{6}$$

$$v_{a1} = \frac{1 - sa_D}{1 - 2sa_D} v_i = v_{ref} \tag{7}$$

$$sa_D = \frac{v_{ref} - v_i}{2v_{ref} - v_i} \tag{8}$$

$$v_{b1} = \frac{1 - sb_D}{1 - 2sb_D} v_i = - v_i \tag{9}$$

$$sb_D = \frac{2v_i}{3v_i} \tag{10}$$

그림 11은 Sag Mode-2의 보상 순서도를 나타낸다. 전압 변동을 검출한 결과 50%이상의 전압 sag로 판단이 되면, 기준 전압 vref에서 전압 sag가 발생된 전원 전압 vi와의 차에 의하여 보상전압 v_sag2와 v_sag3를 구할 수 있다.

계산되어진 보상전압을 이용하여 Sag Mode-2와 Sag Mode-3를 구분하여 Sag Mode-2로 판단되어지면, 식(8)과 식(10)을 이용하여 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비 sa_D, sb_D를 계산한다.

2.2.3 Sag Mode-3

그림 12는 전압 sag 보상영역의 66~75.5% 전압 sag에 대한 Sag Mode-3의 스위칭 모드를 나타낸다. Sag Mode-3 역시 부하에 동상의 보상전압이 필요하게 되고, 전압변동 발생 동안 제안된 시스템은 릴레이-11(Ry1)이 온상태가 되고, 릴레이-2(Ry2)는 오프가 되며, 전원전압 vi와 동상인 보상 전압을 출력하게 된다. 다른 Sag Mode와 동일하게, 2대의 컨버터를 이용하여 동상의 보상 전압을 발생한다. Sag Mode-3에서는 식 (11)에 의해 미리 구하여진 보상 전압 v_{sag3}를 상위/하위 컨버터가 각각 $(v_{sag3}/2)$만큼 나누어 출력한다고 가정하면, 두 컨버터의 출력 전압 va1와 vb1은 식 (12)와 (14)를 이용하여 계산된다. 식 (13)과 (15)에 의하여 듀티비 sa_D와

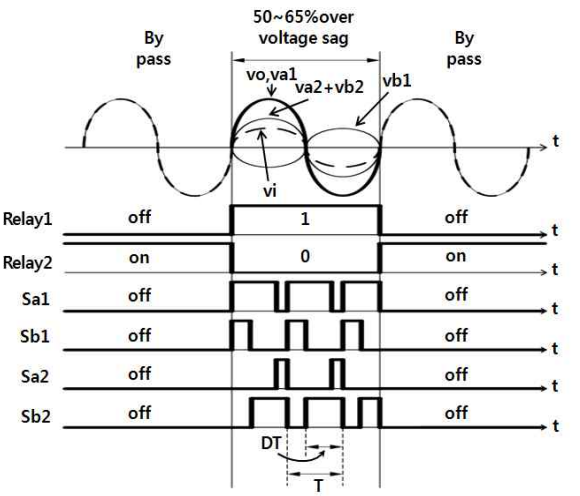


Fig. 10 Switching mode of Sag Mode-2

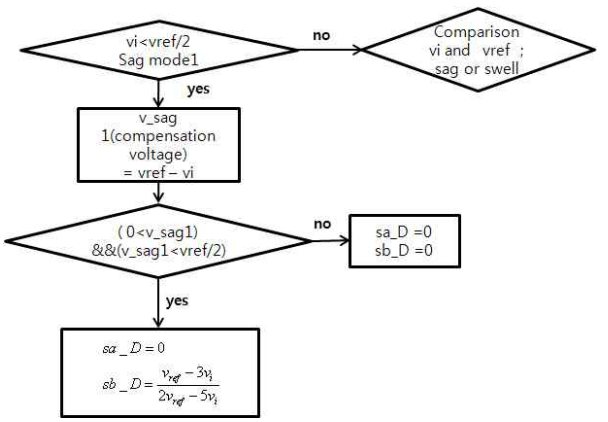


Fig. 9 Flow chart of Sag Mode-1

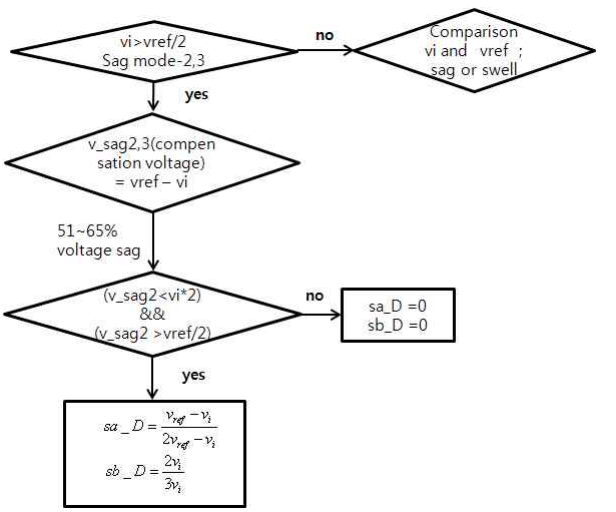


Fig. 11 Flow chart of Sag Mode-2

sb_D가 결정되며, 이 듀티 비에 의하여 출력 전압 va1과 vb2가 발생된다. 전압(va1+vb1)이 결합 변압기를 거치면 보상전압 v_{sag3}=(va2+vb2)이 만들어진다. 다음은 이 모드에 대한 수식을 나타낸다.

$$v_{a1}+v_{b1}=v_{sag3}=v_{ref}-vi \tag{11}$$

$$v_{a1}=\frac{1-sa_D}{1-2sa_D}v_i=\frac{v_{ref}-v_i}{2} \tag{12}$$

$$sa_D=\frac{v_{ref}-3v_i}{2_{ref}-4v_i} \tag{13}$$

$$v_{b1}=\frac{1-sb_D}{1-2sb_D}v_i=\frac{v_{ref}-v_i}{2} \tag{14}$$

$$sb_D=\frac{v_{ref}-3v_i}{2_{ref}-4v_i} \tag{15}$$

그림 13은 66~77.5% 전압 sag인 Sag Mode-3에 대한 보상 순서도를 나타낸다. 전압 변동을 검출한 결과 50%이상의 전압 sag로 판단이 되면, 기준 전압 vref에서 전압 sag가 발생된 전원 전압 vi와의 차에 의하여 보상전압 v_sag2와 v_sag3를 구할 수 있다. 계산되어진 보상전압을 이용하여 Sag Mode-2와 Sag Mode-3를 구분하여 Sag Mode-3로 판단되어지면 식(13)과 식(15)을 이용하여 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비 sa_D, sb_D를 계산한다.

2.2.4 Swell Mode

전압 sag가 전원전압 vi 와 동상의 보상전압이 필요하였다면, 전압 swell의 경우는 전원전압 vi 와 역상의 보상 전압이 필요하다. 그림 14는 전압 swell이 발생하였을 때 제안된 시스템의 전압swell 보상방법인 Swell Mode의 스위칭 모드를 나타내고 있다. 식 (16)에 의해서 제안된 시스템의 보상 전압 v_{swell}이 만들어 지고, 보상전압v_{swell}은 기준 전압 v_{ref}와 전압 변동이 발생한 전원전압 vi 와의 차이로 구할 수 있다. 즉, 보상 전압 v_{swell}을 구할 수 있으므로 Swell Mode에서는 제안된 시스템을 이용하여 역상의 보상 전압을 만들어 준다.

식 (11)에 의해 미리 구한 보상 전압 v_{sag3}를 상위/하위 컨버터가 각각 $(v_{swell}/2)$만큼 나누어 출력한다고 가정하면, 두 컨버터의 출력 전압 va1와 vb1은 식 (17와 (19)를 이용하여 구해진다. 그리고 식 (18)과 (20)으로 구해진 듀티비 sa_D, sb_D로 스위칭을 하면, 절반씩 나누어진 역상의 보상 전압 va1, vb1을 발생할 수 있다. 이 보상 전압들의 합인 (va1+vb1)을 각각의 결합 변압기를 통하면 최종 보상 전압 v_{swell}= (va2+vb2)이 구해진다. 다음은 이상의 관계를 나타낸 수식이다.

$$v_{a1}+v_{b1}=v_{sag3}=v_{ref}-vi \tag{16}$$

$$v_{a1}=\frac{1-sa_D}{1-2sa_D}v_i=\frac{v_{ref}-v_i}{2} \tag{17}$$

$$sa_D=\frac{v_{ref}-3v_i}{2_{ref}-4v_i} \tag{18}$$

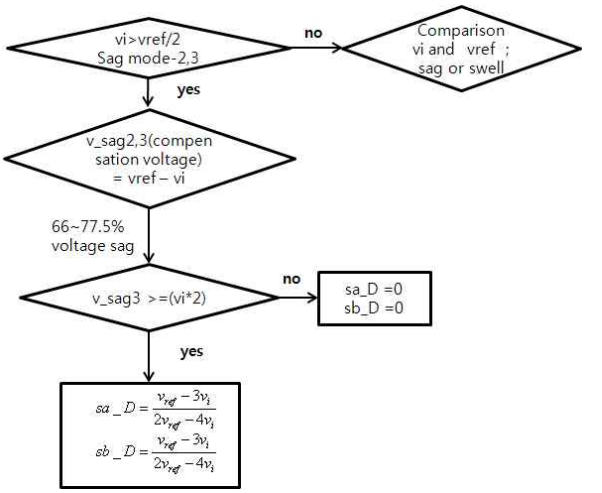


Fig. 13 Flow chart of Sag Mode-3

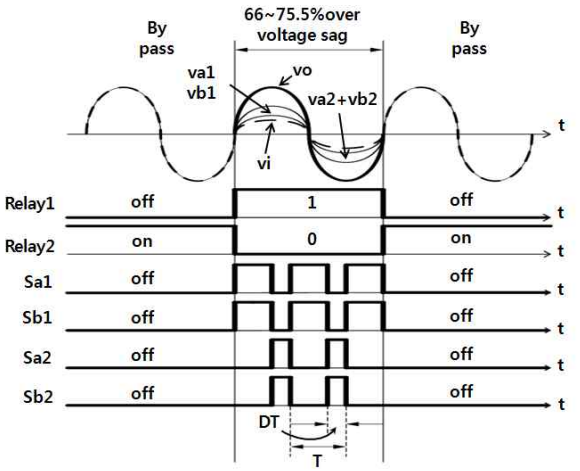


Fig. 12 Switching mode of Sag Mode-3

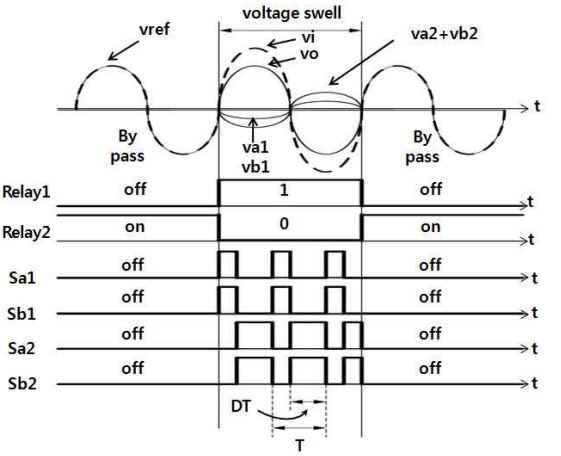


Fig. 14 Switching mode of Swell Mode

$$v_{b1} = \frac{1 - sb_D}{1 - 2sb_D} v_i = \frac{v_{ref} - v_i}{2} \tag{19}$$

$$sb_D = \frac{v_{ref} - 3v_i}{2_{ref} - 4v_i} \tag{20}$$

그림 15는 Swell Mode의 보상 순서도를 나타내고 있다. 전원전압 vi와 기준전압 vref를 비교하여 전압 swell로 판단이 되면, 기준 전압 vref에서 전압 swell이 발생된 전원 전압 vi의 차이로 부터 보상 전압 v_swell을 얻을 수 있다. 보상전압 v_swell을 이용하여 구하여진 식(18)과 식(20)을 이용하여 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비 sa_D, sb_D를 계산한다.

그림 16은 제안된 시스템의 듀티 비 D에 따른 제안된 시스템의 동작 상태를 나타내고 있다. Sag Mode-1은 sa_D를 0으로 고정한 상태에서 0.67≤sb_D≤1 인 조건을 가지며 제안된 시스템의 출력 전압은 50% 미만의 전압 sag에 대한 보상을 할 수 있다.

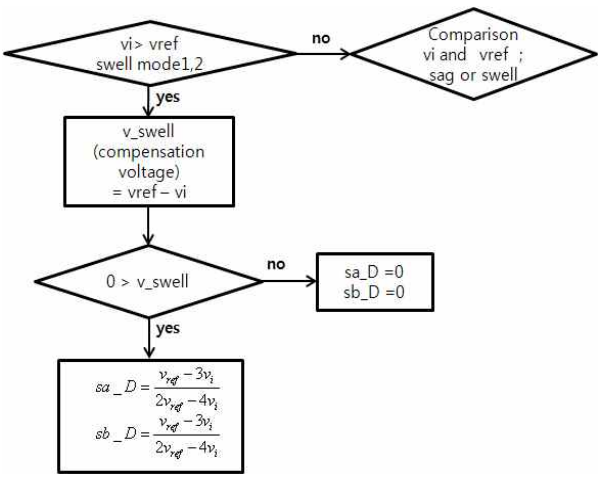


Fig. 15 Flow chart of Swell Mode

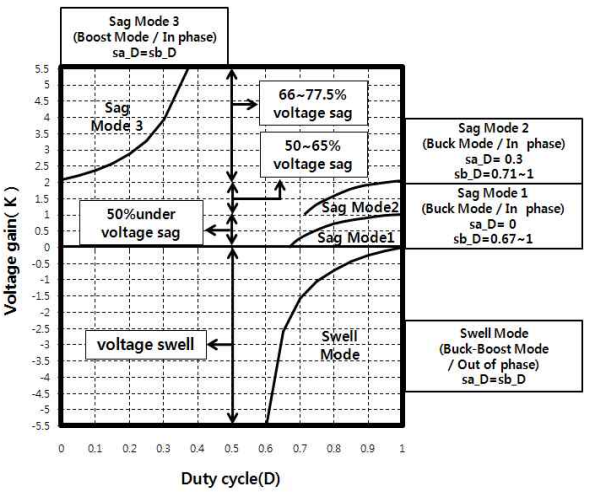


Fig. 16 Operation modes of the proposed system according to duty ratio D

Table 1 Experiment parameters

Input voltage		113Vpeak/ 60Hz
Quasi Z-source network	L1=L2=L3=L4	1mH
	C1=C2=C3=C4	6.8uF
Transformer turn ratio		1:1
Switching Device		IGBT (FGA30N120)
Switching frequency fsw		20kHz
Relay Device		SSR (SDA1-240RVR)
R-C Snubber	Rs	0.1Ω
	Cs	0.01uF
L-C filter	L_{f1}=L_{f2}	3mH
	C_{f1}=C_{f2}	10uF
Load	R	100Ω

또한 Sag Mode-2는 sa_D를 0.3으로 고정하고 0.71≤sb_D≤1 인 조건을 가지며 제안된 시스템의 출력 전압은 50~65%의 전압 sag에 대해 보상 가능하다. Sag Mode-3는 sa_D와 sb_D가 0≤sa_D≤0.37, 0≤sb_D≤0.37인 조건을 가지며 제안된 시스템의 출력 전압은 66~77.5%의 전압 sag를 보상할 수 있다. 마지막으로 Swell Mode는 sa_D 와 sb_D가 0.6≤sa_D≤1, 0.6≤sb_D≤1인 조건을 가지며 제안된 시스템의 출력 전압은 0~100%의 전압 Swell을 보상 가능하다.

3. 실험 결과

3.1 시스템 구성

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여, 전원전압 vi에 20%, 60%의 전압sag와 20%, 60%의 전압swell 이 발생하는 경우에 대한 실험을 수행하였다. 그림 17은 실험 시스템의 사진을 나타내고 있다. 실험에 사용된 파라미

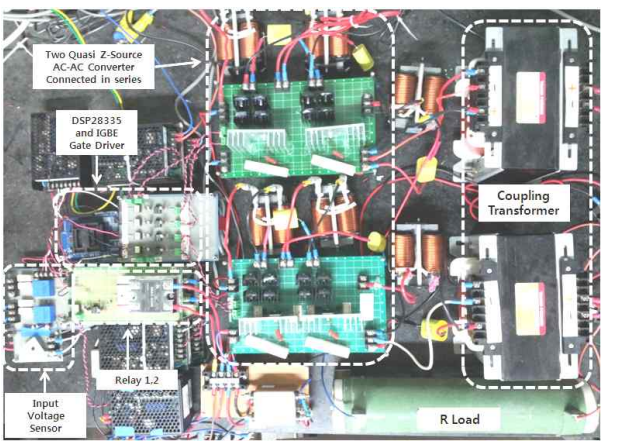


Fig. 17 The experimental system

터는 표 1과 같으며, 전원전압 vi는 113V_{peak} /60Hz이며 출력단의 결합 변압기의 변압비는 1:1이고, 부하 R= 100 Ω이다.

또한 Z-네트워크의 인덕터 L1 = L2 = L3 = L4 = 1mH, 커패시터 C1 = C2 = C3 = C4 = 6.8uF이다. 출력 필터는 Lf = 3mH, Cf = 10uF이고, 각 스위치의 R-C스너버 회로는 Rs=0.1Ω, Cs=0.01uF로 하였다. 스위칭 소자(Sa1,Sa2, Sb1,Sb2)는 IGBT (FGA30N120)가 사용되었으며, 스위칭 주파수는 20kHz이고, 다이오드는 D1~D6는 DSEI60-12A를 사용하였다. 그리고 릴레이-1과 2는 랜덤형 SSR (SDA1-240RVR)이 사용되었고, PWM 듀티비 제어 및 릴레이 제어하기 위하여 DSP28335가 사용되었다.

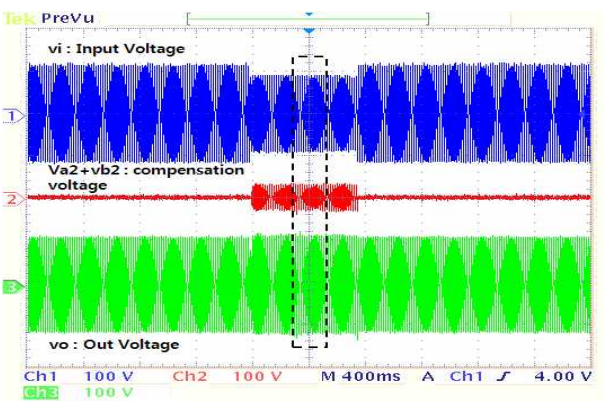
3.2 전압 sag 보상 결과

그림 18(a)는 400ms동안 20%의 전압 sag가 발생하였을 때, Sag Mode-1에 의한 보상 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 전원 전압 vi에 전압 변동이 발생하기 전에는 제안된 시스템의 출력이 전원 전압과 부하 전압에 영향을 주지 않고 있다. 전압 변동이 발생을 하면 제안된 시스템에서 발생한 보상 전압이 부하 전압의 강하분을 보상함을 알 수 있다. 따라서 제안된 방법으로 종전의 보상기[11,12]의 보상 불가능한 영역인 50%미만의 전압 sag가 보상 가능함을 알 수 있다. 그리고 그림 18(b)는 20%의 전압 sag의 보상영역을 확대한 파형(20ms동안)이다. 전원 전압 vi에 20%만큼의 전압 sag가 발생하더라도 해당 부분 만큼 동상의 보상 전압(va2+vb2)을 발생하므로, 부하 전압 vo는 전압sag 발생 전의 전압으로 회복됨을 볼 수 있다.

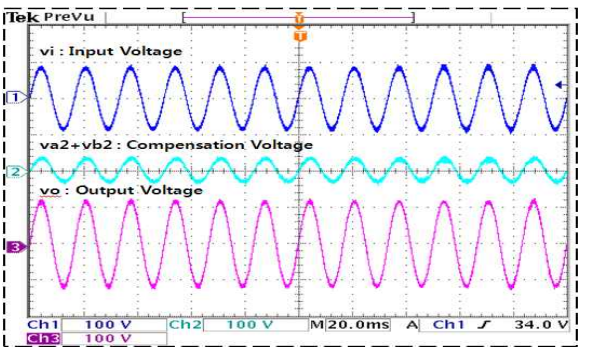
그림 19(a)는 400ms동안 60%의 전압 sag가 발생하였을 때, Sag Mode-2에 의한 보상 결과를 나타내고 있다. 그리고 그림 19(b)는 60%의 전압 sag의 보상영역을 확대한 파형(20ms동안)이다. 전압변동이 발생한 전원전압 vi에 대하여 sag가 발생한 60%만큼의 동상의 보상전압(va2+vb2)를 부하전압 vo에 보상해주고 있음을 볼 수 있다.

3.3 전압 swell 보상 결과

그림 20(a)는 400ms동안 20%의 전압 swell이 발생하였을 때 Swell Mode에 의한 보상 결과를 나타내고 있다. Swell Mode 역시 Sag Mode와 동일하게 전압 변동이 발생하기 전에는 제안된 시스템의 출력은 전원전압과 부하전압에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 20(b)는 20%의 전압 swell의 보상영역을 확대한 파형

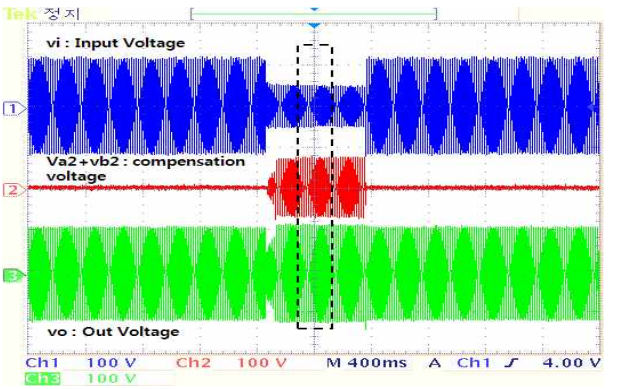


(a) 400msec/div.

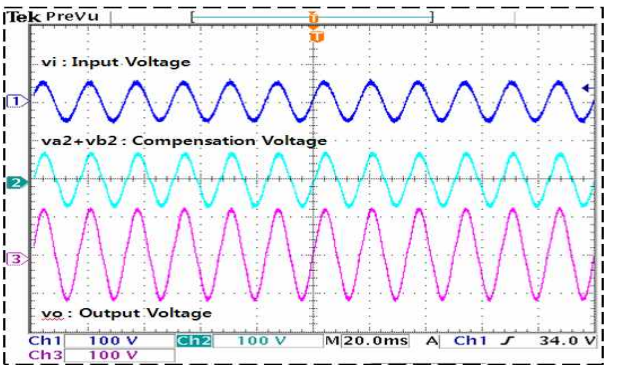


(b) 20msec/div.

Fig. 18 Compensation result for the 20% voltage sag (Sag Mode-1)(vi:100V/div.,vo:100V/div.)



(a) 400msec/div.



(b) 20msec/div.

Fig. 19 Compensation result for 60% voltage sag(Sag Mode-2)(vi:100V/div.,vo:100V/div.)

(20ms동안)이다. 전압변동이 발생한 부하전압에 필요한 20%의 역상의 보상전압 (va2+vb2)가 출력되어 부하전압 vo을 보상함을 알 수 있다.

그림 21(a)는 400ms동안 60%의 전압 swell이 발생하였을 때, Swell Mode에 의한 보상 결과를 나타내고 있다. 그림 21(b)는 60%의 전압 swell의 보상영역을 확대한 파형(20msec동안)이다. 전압변동이 발생한 부하전압에 60%만큼의 역상의 보상전압 (va2+vb2)을 실시간적으로 보상해주고 있음을 볼 수 있다.

그림 22는 부하변동에 따른 전압 sag-swell의 전압 보상율을 나타낸다. 전압 보상율 1은 전압 변동 시 제안된 시스템으로 전압 변동 전의 정상상태 전압으로 100% 회복된 것을 의미한다. Sag 나 swell 모두 부하저항의 클수록 약간씩 보상율이 떨어지는 경향이 있으나, 거의 1에 가깝게 보상되고 있음을 확인할 수 있다.

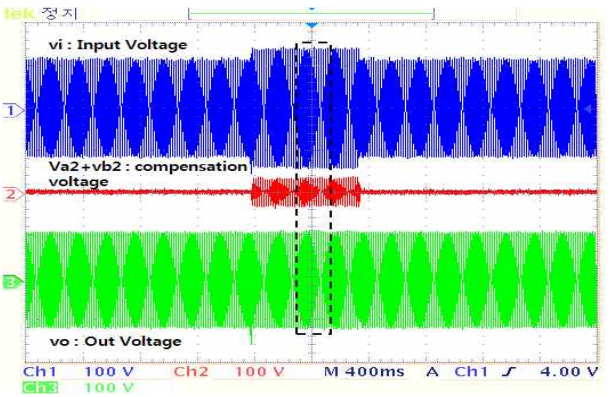
그림 23은 부하 변동과 전압sag-swell 보상 후 부하전압의 THD를 나타내고 있다. 일반적으로 임의의 파형의 THD가 0%인 경우에는 그 파형은 이상적인 정현파가 되며, THD가 클수록 왜형이 심함을 의미한다.

IEEE Std. 159-1992에서는 THD의 기준 규제치 범위를 5%미만으로 규정하고 있다. 그림 23의 전압 sag-swell 보상 후의 THD를 살펴보면, 보상범위가 커질수록 THD가 증가하는 추세이나, 모두 5%미만의 양호한 THD를 보이고 있다.

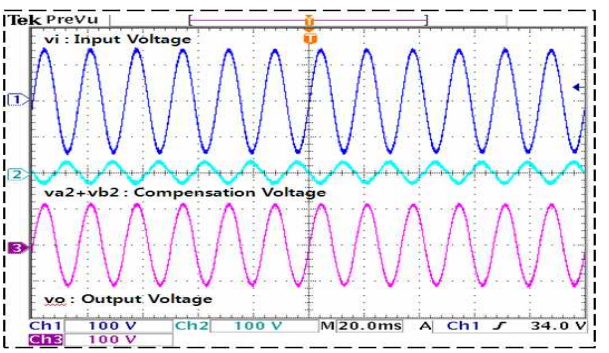
4. 결 론

본 연구에서는 전원전압 $113V_{peak}$/60Hz에서 발생되는 전압 변동을 보상하기 위한 Quasi Z-소스 AC-AC 컨버터를 이용한 전 영역 전압 sag-swell보상 시스템을 제안하였다. 종전의 1대의 Quasi Z-소스 AC-AC 컨버터를 이용한 보상기는 배터리와 같은 별도의 에너지 저장장치가 필요 없다는 장점을 가지고 있지만, 가장 빈번하게 발생되는 50%미만의 전압 sag에 대한 보상은 불가능하였다. 그러나 제안된 방법은 Quasi Z-source AC-AC 컨버터 2대의 출력 단을 직렬로 연결하고, 상위 컨버터 듀티비 sa_D와 하위 컨버터 sb_D를 교차 스위칭하여 동상과 역상의 buck-boost모드 전압을 모두 발생시켜 이상의 문제점을 해결하였다.

제안된 시스템의 사례 검증을 위하여 DSP기반의 실험 장치를 제작하였다. 그 결과, 전원전압 vi에서 20%, 60%의 전압 sag와 전압 swell이 발생하는 경우, 제안된 시스템에 의해서 전 영역의 전압 sag-swell이 모두 보상 가능함을 확인할 수 있었다. 또한 전압 변동과 부하 변

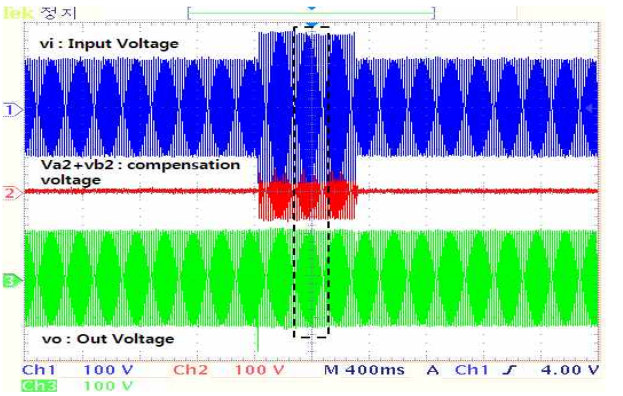


(a) 400msec/div.

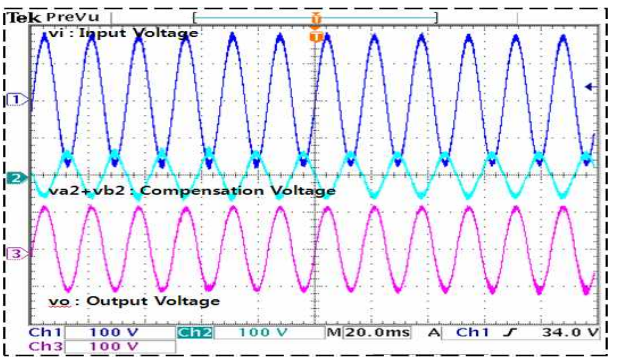


(b) 20msec/div.

Fig. 20 Compensation result for 20% voltage swell (Swell Mode)(vi:100V/div.,vo:100V/div.)

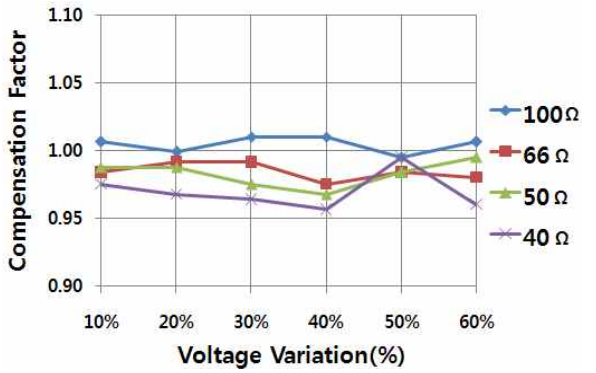


(a) 400msec/div.

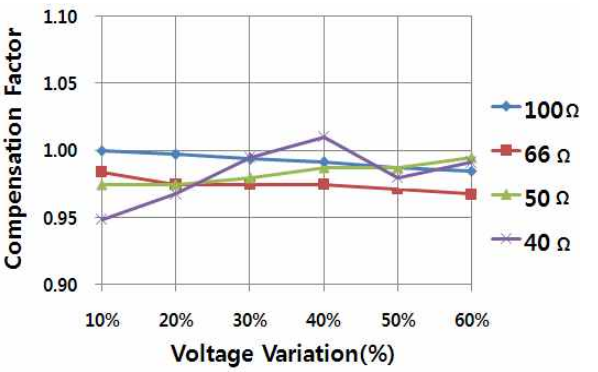


(b) 20msec/div.

Fig. 21 Compensation result for 60% voltage swell (Swell Mode)(vi:100V/div.,vo:100V/div.)

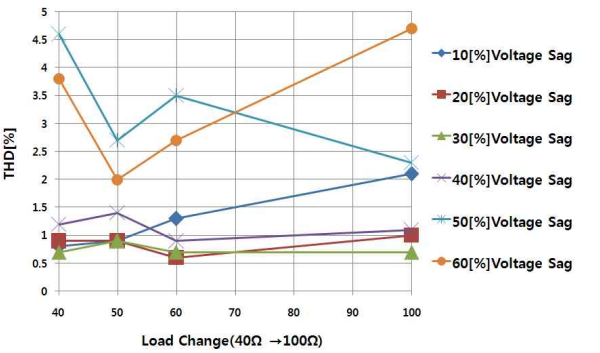


(a) Compensation factor for voltage sag

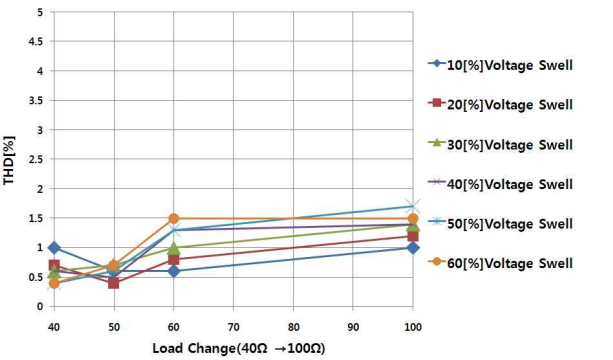


(b) Compensation factor for voltage swell

Fig. 22 Voltage compensation factor for different load variation



(a) After sag compensation



(b) After swell compensation

Fig. 23 Comparison of the compensated load voltage THD according to the loads change and voltage sag-swell

동에 따른 전압 보상율과 보상 후 전압의 THD를 측정하여 제안된 시스템의 전력 품질에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

References

[1] G. T. Heydt, "Power quality engineering," *IEEE Power Eng. Rev.*, pp. 5-7, Sep. 2001.

[2] R. Dugan, M. Mc Grannaghan, S. Santoso, and H. Beaty, Electrical Power systems Quality. *New York: McGraw-Hill,* 2002.

[3] M. McGranaghan, "Overview of Power Quality Standards," *PQ Network Internet Site,* http://www.pqnet.electrotek.com/pqnet.

[4] Power Quality Tutorial, "PQ103-Equipment Sensitivity Basics," *Power Quality Assurance Internet Site,* http://www.powerquality.com/pqpark.

[5] Mark F. McGranaghan et al, "Voltage Sags in Industrial Systems," *IEEE Trans. Ind. Applicat.,* Vol. 29, No. 2, pp. 397-403, 1993.

[6] Y.W. Li, P.C. Loh, F. Blaabjerg, and D. M. Vilathgamuwa, "Investigation and Improvement of Transient Response of DVR at Medium Voltage Level," *IEEE Trans. Ind. Applicat.,* Vol. 43, No. 5, pp. 1309-1319, 2007.

[7] M. Vilathgamuwa, A. A. D. R. Perera, S. S. Choi, and K. J. Tseng, "Control of Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer," *in Proc. IEEE IECON'99,* pp. 873-878, 1999.

[8] T. Jimichi, H. Fujita, and H. Akagi, "Design and Experimentation on a Dynamic Voltage Restorer Capable of Significantly Reducing an Energy- Storage Element," *in Proc. IEEE IAS'05,* pp. 896-903, 2005.

[9] D. M. Vilathgamuwa, C. J. Gajanayake, P. C. Loh, and Y. W. Li, "Voltage Sag Compensation with Z-Source Inverter Based Dynamic Voltage Restorer," *in Proc. IEEE IAS'06,* pp. 2242-2248, 2006.

[10] Y. G. Jung, "Three-Phase Z-Source Dynamic Voltage Restorer with a Fuel Source," *Journal of KIIEE,* Vol. 22, No. 10, pp. 41-48, 2008.

[11] M. K. Nguyen, Y. G. Jung, and Y. C. Lim, "Single-Phase Z-Source Voltage Sag/Swell Compensator," *in Proc. IEEE ISIE'09,* pp. 24-28, 2009.

[12] K. T. Lee, Y. G. Jung, and Y. C. Lim, "A Single-Phase Quasi Z-Source Dynamic Voltage Restorer(DVR)," *Journal of KIPE,* Vol. 15, No. 4, pp. 327-334, 2010.

[13] Math H.J. Bollen, "Understanding Power Quality Problems-Voltage Sags and Interruptions," *IEEE Press,* 2000.

엄준현(嚴俊鉉)

1981년 3월 29일생. 2006년 2월 조선대 제어계측공학과 졸업. 2008년 8월 전남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 현재 대불대 융합기술학부 부교수.

임영철(任永徹)

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1997년 호주 모나시대 Visiting Scholar. 1998년~2007년 산업자원부 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC)소장. 현재 전남대 전기공학과 교수. 2009년 당 학회 회장 역임.