

# 두 개의 Quasi Z-소스 AC-AC 컨버터에 의한 6.6[kV]/60[Hz] 배전계통의 동적 전압 보상기(DVR)

논 문
61-2-3

## Dynamic Voltage Restorer (DVR) for 6.6[kV]/60[Hz] Power Distribution System Using Two Quasi Z-Source AC-AC Converters

엄 준 현\* · 정 영 국<sup>†</sup> · 임 영 철\*\* · 최 준 호\*\*\*  
(Jun-Hyun Oum · Young-Gook Jung · Young-Cheol Lim · Joon-Ho Choi)

**Abstract** - This paper proposes a quasi Z-source DVR(Dynamic Voltage Restorer) system with a series connection of the output terminals, to compensate the voltage variations in the 6.6[kV]/60[Hz] power distribution system. The conventional DVR using one quasi Z-source AC-AC converter has the advantage which it can compensate the voltage variations without the need for the additional energy storage device such as a battery, but it is impossible to compensate for the 50[%] under voltage sags. To solve this problem, a DVR system using two quasi Z-source AC-AC converters with the series connection of the output terminals is proposed. By controlling the duty ratio D in the buck-boost mode, the proposed system can control the compensation voltage. For case verification of the proposed system, PSIM simulation is achieved. As a result, in case that the voltage sags-swells occur 10[%], 20[%], 60[%] in power distribution system, and, in case that the 50[%] under voltage sags-swells continuously occur, all case could compensate by the proposed system. Especially, the compensated voltage THD was examined under the condition of the 10[%]~50[%] voltage sags and the 20[Ω]~100[Ω] load changes. The compensated voltage THD was worse for the higher load resistances and more severe voltage sags. Finally, In case of the voltage swells compensation, the compensation factor has approached nearly 1 regardless of the load resistance changes, while the compensation factor of voltage sags was related to the load variations.

**Key Words** : Quasi Z-source AC-AC converter, Series connection, Voltage sag-swell compensation, Power distribution system, Compensation factor, THD, Duty ratio

### 1. 서 론

최근 우리의 생활수준의 향상으로 인해 컴퓨터, 자동화 생산시설, 정밀전자 장비 등과 같이 전력 품질에 민감한 장치들이 급속하게 보급되고 있는 추세이다. 전력 품질은 전력 계통에서 전압, 전류, 주파수의 변동을 의미하며, 이것들의 변동 크기와 지속 시간에 따라 전력 품질을 저해하는 요인을 분류 가능하다[1]. 전력 품질은 전압 변동, 주파수 변화, 전압 불평형, 파형 왜곡과 같이 세분 가능하나, 크게 전압품질(Voltage quality)과 주파수 품질(Frequency quality)로 나눌 수 있다[2]. 전압 품질 문제는 고객에게 직접적으로 미치는 영향이 크고 치명적이므로 전력 회사에서 지속적으로 품질 개선을 위한 대책을 강구하고 있다. 전압 품질은 정전 개념의 영구 정전(Sustained interruption), 순간 정전(Momentary interruption)과 순간 전압 변동으로 인한 플리커 및 순시 전압 강하가 있다. IEEE Standard. 1159

에 나타난 전압 크기에 대한 규정에 의하면, 전압 크기가 공칭 전압의 0.1~0.9[p.u.]이고 지속 시간이 0.5~30[Cycles] 일 경우를 순간 sag(Instantaneous sag)라고 하며, 전압 크기가 공칭 전압의 1.1~1.8[p.u.]이고 지속 시간이 0.5~30[Cycles]일 경우를 순간 swell(Instantaneous swell)라고 정의하고 있다[3].

이상의 문제점을 해결하기 위하여, 현재까지는 무정전 전원장치(UPS)가 널리 사용되어 왔다. 그러나 UPS는 기본적으로 정전에 대비한 장치로 순간 전압 강하가 발생하는 경우에도 입력 전원을 차단하고 UPS가 모든 부하를 담당하게 되므로 그다지 효율적이지 못하다[4]. 순간 전압 강하 보상은 이 문제에 효율적으로 대처하기 위한 기기로 입력 전압에서 강하된 부분 또는 상승된 부분만큼을 보상하는 장치이다. 이렇게 동작하는 순간 전압 강하 보상기의 경우, 전압 변동분 만 보상하기 때문에 UPS에 비해 용량이 현격하게 줄어들 수 있는 장점이 있다.

한편 DC-AC인버터 구조의 일반적인 동적 전압 보상기(DVR)는 유효 전력을 다루기 때문에 별도 에너지 저장장치(Energy storage system : ESS)를 필요로 한다[5-8]. 에너지 저장장치로는 커패시터, 배터리 등이 있으나 소비 전력이 증가하게 되면 에너지 저장장치의 크기도 증가하게 되고, 결국에는 시스템의 비용이 증가하는 문제점이 발생된다. 이를 해결하기 위하여 단상 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터 구조의

\* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 박사과정  
\*\* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 교수  
\*\*\* 정 회 원 : 전남대학교 전기공학과 부교수  
† 교신저자, 정회원 : 대불대학교 융합기술학부 부교수  
E-mail : jyg@db.ac.kr  
접수일자 : 2011년 10월 1일  
최종완료 : 2012년 1월 27일

DVR[9,10]이 제안되었다. 이 방법은 정상 전압에 대하여 0.5~0.65[p.u], 즉 50~65[%]의 전압 sag와 전 영역에서의 전압 swell은 보상이 가능하나, 산업 현장에서 많이 발생하는 50[%] 미만의 전압 sag는 보상이 불가능하다는 큰 문제점이 있다.

본 연구에서는 2대의 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터를 이용하여 입력은 병렬로 연결하고 출력은 직렬로 연결한 6.6[kV]/ 60[Hz]급 quasi-Z-소스 DVR을 제안하여 이상의 문제점을 해결하였다. 제안된 시스템은 quasi-Z-소스 AC-AC 컨버터의 특징인 연속 전류 모드(CCM)로 동작하며, 듀티 비 D에 따라 buck-boost모드의 전압을 발생시킬 수 있다. 계통 전압의 변동 상태에 따라 Sag Mode-1, Sag Mode-2, Sag Mode-3 그리고 Swell Mode로 나누고 보상 순서도를 제시하였으며, 각 모드에 대한 상위/하위 컨버터의 듀티 비 D를 계산하였다. 제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위하여, 6.6[kV]/60[Hz]급의 배전 계통에 대한 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 계통 전압에 20[%], 60[%]의 전압 sag와 전압 swell이 개별적으로 발생하는 경우와 10[%]에서 20[%]로 전압 sag와 전압 swell이 연속적으로 발생하는 사례 고찰을 통하여 제안된 보상기의 성능을 파악하였다. 그 결과, 60[%]의 전압 sag가 발생하는 경우의 첫 번째 반 주기의 보상 오차를 제외하고는, 모든 경우에 대하여 보상 성능이 양호하였다. 또한 전압 sag와 전압 swell이 연속적으로 발생하는 과도 상태에 대한 보상 특성도 보상 지연이 없이 잘 보상됨을 알 수 있었다. 끝으로 전압 sag와 swell의 변화에 따른 전압 보상율을 파악하였으며, 부하 변동과 전압 sag 발생에 대한 보상 후 전압의 총고조파 왜형률(THD)을 검토하였다.

## 2. 제안된 시스템

그림 1은 본 연구에서 제안된 시스템을 나타내고 있다. 계통 전압  $v_i$ 의 전압 변동이 없는 경우, 릴레이 1과 2는 오프 상태가 되어 DVR시스템은 동작 하지 않으며, 이때 릴레이 3은 온 상태가 되어 부하에 전력이 공급된다. 하지만 계통 전압에 전압 변동이 발생하였을 경우에는 릴레이 1과 2가 온이 되어 DVR은 동작을 하며, 이때 릴레이 3은 오프 상태가 된다. 그리고 출력이 직렬 연결된 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터는 상위 컨버터와 하위 컨버터가  $R_s - C_s$  스너버를 포함하는 저압의 양방향 전력용 스위치 IGBT(Sa1, Sa2 및 Sb1, Sb2)와 스위치의 온, 오프 상태에 따라 보상 에너지의 저장과 방출이 이루어지는 quasi Z-소스 네트워크, 출력 Lf-Cf필터, DVR 시스템의 보상전압을 계통 측으로 주입하기 위한 가극성의 결합 변압기로 구성되어 있다.

그림 2는 제안된 시스템의 기본적인 PWM 듀티 비의 제어 원리를 나타내고 있다. 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 온되는 동안 Z-소스 컨버터는 active 모드로 동작하고, 상위 컨버터와 하위 컨버터의 Sa2, Sb2가 DT만큼 오프되는 동안 Z-소스 컨버터는 암 단락 상태가 된다.

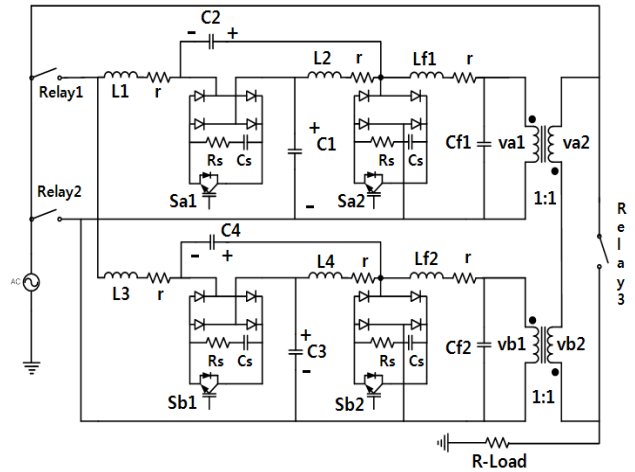


그림 1 제안된 시스템  
Fig. 1 The proposed system

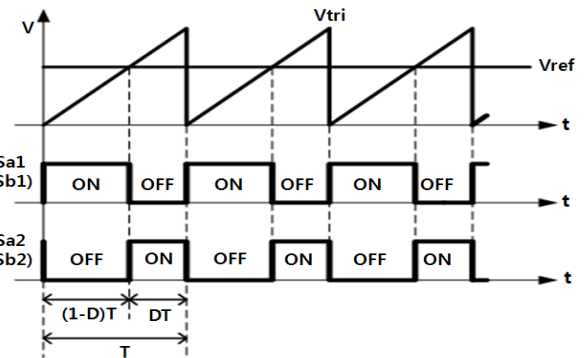


그림 2 제안된 시스템의 PWM 듀티비 제어  
Fig. 2 PWM duty ratio control of the proposed system

### 2.1 보상 원리

전압 sag가 발생했을 때는 계통 전압과 동상의 보상 전압이 필요하므로, DVR시스템은 계통 전압과 동상의 보상 전압을 만들어 보상하면 된다. 그림 3은 전압 sag가 발생하였을 때, 제안된 DVR 시스템의 모드별 스위칭 방법이다. 그림 3에서 보는 바와 같이, 50[%]미만의 전압 sag를 Sag Mode-1, 50~65[%] 전압 sag를 Sag Mode-2, 66~75.5[%] 전압 sag를 Sag Mode-3로 구분하였다. Sag Mode-1의 스위칭 방법은 식 (1)과 같이 2대 컨버터의 출력 값이 보상 전압  $v_{sag1}$ 이 되고, 보상 전압은 기준 전압  $v_{ref}$ 와 전압 변동이 일어난 입력 전압  $v_i$ 과의 차이로 구해진다. 즉, 보상 전압  $v_{sag1}$ 을 구할 수 있으므로 Sag Mode-1에서는 2대의 컨버터를 이용하여 동상의 보상 전압을 만든다. 일단, 상위 컨버터의 출력 전압 va1은 듀티 비 sa\_D를 0으로 하여 전압 sag 발생 시 입력 전압  $v_i$ 와 동상의 va1이 발생되도록 한다. 그리고 하위 컨버터의 출력 전압 vb1은 식 (3)에 의해 구할 수 있고, 구해진 출력 전압 vb1은 식 (5)에 의해 듀티 비 sb\_D를 구하면 역상 전압인 vb1이 발생된다. 상위 컨버터에서 발생된 동상인 출력 전압 va1과 하위 컨버터에서 발생된 역상의 출력 전압 vb1을 서로 합한 (va1+vb1)은 가극

성 결합 변압기를 거치 최종적인 보상 전압  $v_{sag1}=(va2+vb2)$  이 발생된다.

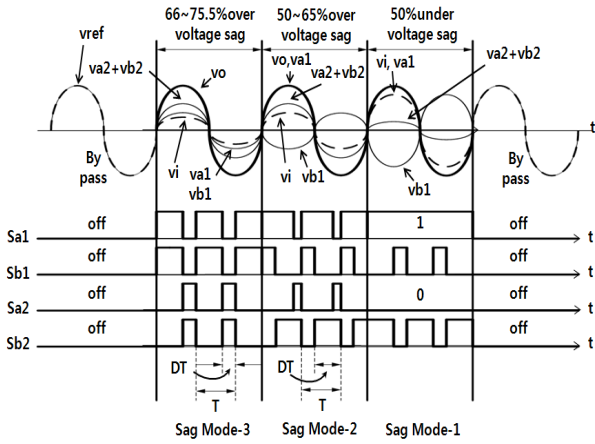


그림 3 전압 sag에 대한 스위칭 모드  
Fig. 3 Switching mode for voltage sag

이상에 대한 수식은 다음으로 나타내진다.

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

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

상위 컨버터의 D를 0으로 고정하면, 다음을 얻게 된다.

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

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

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

그림 3의 Sag Mode-2 대한 스위칭 방법 역시 2대의 컨버터를 이용하여 식 (6)으로 동상의 보상 전압  $v_{sag2}$ 을 얻을 수 있다. 먼저 상위 컨버터의 출력 전압  $va1$ 은 식 (7)과 같이 기준 전압  $v_{ref}$ 가 발생하도록 구하면 식 (8)의 듀티 비  $sa\_D$ 가 결정된다. 그리고 하위 컨버터의 출력 전압  $vb1$ 은 식 (9)로 구해지며, 식 (10)에 의해 듀티 비  $sb\_D$ 로 스위칭 하면 역상 전압인  $vb1$ 가 얻어진다. 상위 컨버터의 동상인 출력 전압  $va1$ 과 하위 컨버터의 역상인 출력 전압  $vb1$ 을 서로 합한  $(va1+vb1)$ 은 가극성 결합 변압기를 거치 최종적인 보상 전압  $v_{sag2}=(va2+vb2)$ 이 얻어진다.

$$v_{a1} + v_{b1} = v_{sag2} \quad (6)$$

$$v_{a1} = \frac{1 - sa\_D}{1 - 2sa\_D} v_i = v_{ref} \quad (7)$$

$$sa\_D = \frac{v_{ref} - v_i}{2v_{ref} - v_i} \quad (8)$$

$$v_{b1} = \frac{1 - sb\_D}{1 - 2sb\_D} v_i = -v_i \quad (9)$$

$$sb\_D = \frac{2v_i}{3v_i} \quad (10)$$

그림 3의 Sag Mode-3에 대한 스위칭 방법 역시 다른 Sag Mode와 동일하게 2대의 컨버터를 이용하여 동상의 보상 전압을 발생한다. 식 (11)은 보상 전압  $v_{sag3}$ 를 나타내고 있다. Sag Mode-3에서는 상위/하위 컨버터가 보상 전압  $v_{sag3}$ 를 절반씩 분담하고 있으며, 두 컨버터의 출력 전압  $va1$ 과  $vb1$ 은 식 (12)와 (14)를 이용하여 구해진다. 식 (13)과 (15)에 의하여 듀티비  $sa\_D$ 와  $sb\_D$ 가 결정되며, 이 듀티비에 의하여 출력 전압  $va1$ 과  $vb2$ 가 발생된다. 전압  $(va1+vb1)$ 이 가극성 결합 변압기를 거치 보상전압  $v_{sag3}=(va2+vb2)$ 이 만들어진다. 다음은 이 모드에 대한 수식을 나타낸다.

$$v_{a1} + v_{b1} = v_{sag3} = v_{ref} - v_i \quad (11)$$

$$v_{a1} = \frac{1 - sa\_D}{1 - 2sa\_D} v_i = \frac{v_{ref} - v_i}{2} \quad (12)$$

$$sa\_D = \frac{v_{ref} - 3v_i}{2v_{ref} - 4v_i} \quad (13)$$

$$v_{b1} = \frac{1 - sb\_D}{1 - 2sb\_D} v_i = \frac{v_{ref} - v_i}{2} \quad (14)$$

$$sb\_D = \frac{v_{ref} - 3v_i}{2v_{ref} - 4v_i} \quad (15)$$

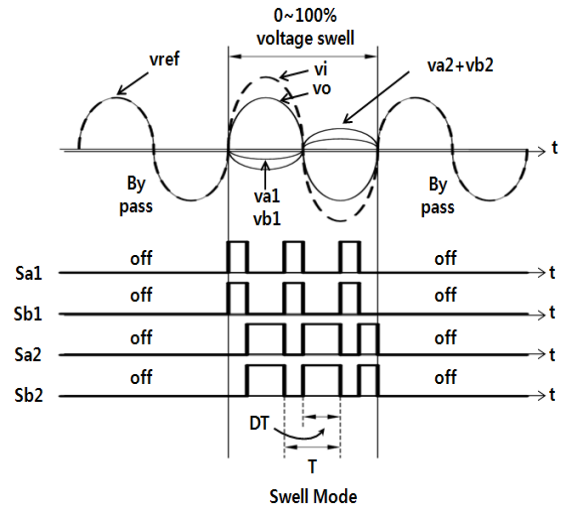


그림 4 전압 swell에 대한 스위칭 모드  
Fig. 4 Switching mode for voltage swell

전압 sag와는 다르게 전압 swell의 경우는 계통 전압과 역상의 보상 전압이 필요하다. 그림 4는 전압 swell이 발생 하였을 때, DVR 시스템의 모드별 스위칭 방법을 나타내 것이다. 식 (16)과 같이 2대 컨버터의 출력 전압의 합에 의해 보상 전압  $v_{swell}$ 이 만들어 지고, 보상 전압은 기준 전압  $v_{ref}$ 와 전압 변동이 발생한 입력 전압과의 차이로 구할 수 있

다. 즉, 보상 전압  $v_{swell}$ 을 구할 수 있으므로 Swell Mode 스위칭 방법에서는 2대의 컨버터를 이용하여 역상의 보상 전압을 만든다. 식 (17)과 (19)에 의해 상위 컨버터와 하위 컨버터에서 각각 절반씩 분담해야할 역상의 보상 전압이 구해진다. 그리고 식 (18)과 (20)으로 구해진 듀티비  $sa_D$ ,  $sb_D$ 로 스위칭 하면 절반씩 나누어진 역상의 보상 전압  $va1$ ,  $vb1$ 을 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.

$$v_{a1} + v_{b1} = v_{swell} = v_{ref} - v_i \quad (16)$$

$$v_{a1} = \frac{1 - sa\_D}{1 - 2sa\_D} v_i = \frac{v_{ref} - v_i}{2} \quad (17)$$

$$sa\_D = \frac{v_{ref} - 3v_i}{2v_{ref} - 4v_i} \quad (18)$$

$$v_{b1} = \frac{1 - sb\_D}{1 - 2sb\_D} v_i = \frac{v_{ref} - v_i}{2} \quad (19)$$

$$sb\_D = \frac{v_{ref} - 3v_i}{2v_{ref} - 4v_i} \quad (20)$$

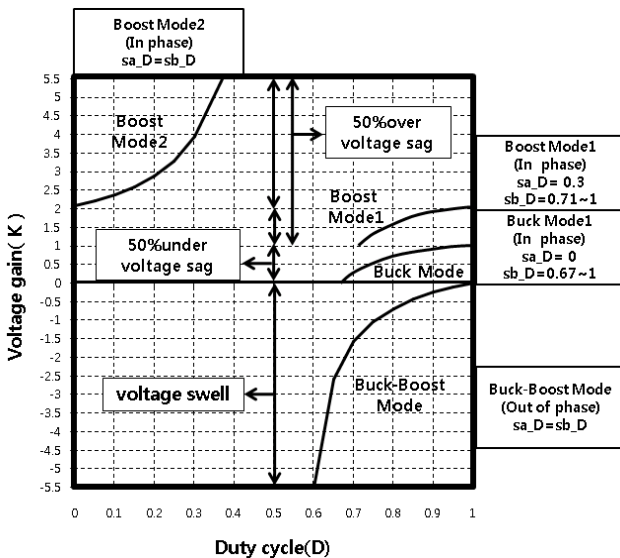


그림 5 듀티 비 D에 따른 제안된 시스템의 동작 상태  
Fig. 5 Operation modes of the proposed system according to duty ratio D

그림 5는 제안된 시스템의 듀티비 D에 따른 부하 전압 게인(K)을 나타내고 있다. Sag Mode-1은  $sa_D$ 를 0으로 고정된 상태에서  $0.67 \leq sb_D \leq 1$ 인 조건 동안은 제안된 시스템의 출력 전압은 50[%] 미만의 전압 sag에 대한 보상을 할 수 있다. 또한 Sag Mode-2는  $sa_D$ 를 0.3으로 고정하고  $0.71 \leq sb_D \leq 1$ 인 조건 동안 제안된 시스템의 출력 전압은 50~65[%]의 전압 sag에 대해 보상 가능하다. Sag Mode-3는  $sa_D$ 와  $sb_D$ 가  $0 \leq sa_D \leq 0.37$ ,  $0 \leq sb_D \leq 0.37$ 인 조건

동안 제안된 시스템의 출력 전압은 66~75[%]의 전압 sag를 보상할 수 있다. 마지막으로 Swell전압 대하여서는  $sa_D$ 와  $sb_D$ 가  $0.6 \leq sa_D \leq 1$ ,  $0.6 \leq sb_D \leq 1$ 인 조건 동안 제안된 시스템의 출력 전압은 0~100[%]의 전압 Swell를 보상 가능함을 알 수 있다.

## 2.2 전압 변동 검출과 보상 모드

그림 6은 제안된 시스템의 전압 변동을 검출하는 순서도를 나타낸다. 계통 전압에 전압 변동이 없으면, 릴레이 1과 2는 오프 상태이고 릴레이 3은 온 상태이다. 만일 기준 전압  $v_{ref}$  보다 크거나 작아지는 전압 변동이 발생 되면 릴레이 1과 2는 온 상태가 되고, 릴레이 3은 오프 상태로 된다. 전압이 변동하면 DVR시스템은 동작 하고, 기준 전압  $v_{ref}$ 와 계통 전압  $v_i$ 은 비교가 되어  $v_i$ 이  $v_{ref}/2$  보다 작으면 50[%] 미만의 전압 sag로 판단하고,  $v_i$ 이 기준 전압  $v_{ref}$ 보다 작고  $v_{ref}/2$ 의 전압 보다 크거나 같으면 50[%] 이상의 전압 sag로 판단한다. 그리고  $v_i$ 이  $v_{ref}$ 의 전압 보다 크거나 같으면 전압 swell로 판단한다.

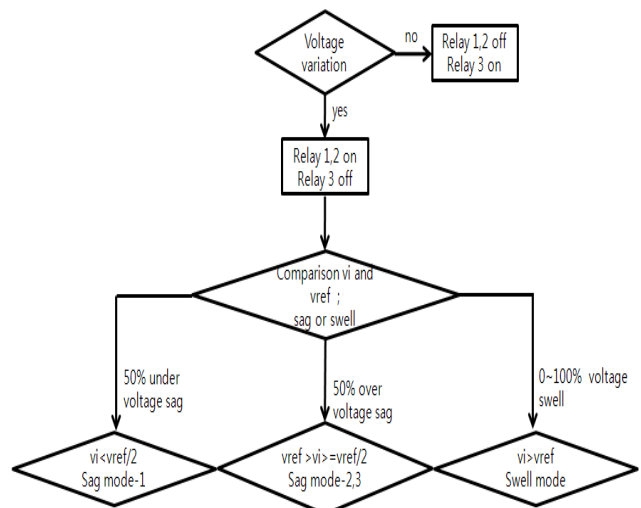


그림 6 전압 변동 검출 순서도  
Fig. 6 Flow chart of the voltage variation

### 2.2.1 Sag Mode - 1

그림 7은 50[%]미만 전압 sag에 대한 보상 순서도이다. 전압 검출 결과 50[%]미만의 전압 sag로 판단되는 경우, 기준 전압  $v_{ref}$ 에서 전압 sag가 발생된 입력전압  $v_i$ 를 빼면 보상전압  $v_{sag1}$  전압을 얻을 수 있다. 전 판별단계인 50[%]미만 전압과 50[%]이상 전압 판별 단계에 대하여 오류 방지를 위한 50[%]미만 전압의 범위를 지정한다. 보상전압  $v_{sag1}$  보상 전압이 0보다 크고  $v_{ref}/2$ 보다 낮으면 50[%]미만 전압으로 판단되어 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비  $sa_D$ ,  $sb_D$ 를 계산하게 된다. 하지만 그렇지 않은 경우에는 다시 전압 sag인지 전압 swell인지를 판단하는 처음단계로 돌아간다.

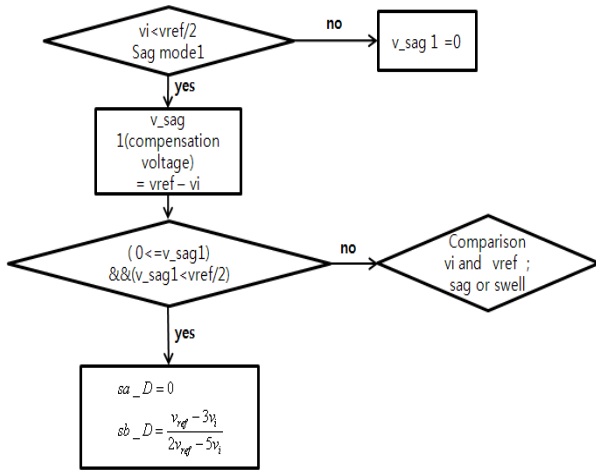


그림 7 50[%] 미만의 전압 sag보상 순서도  
 Fig. 7 Flowchart for the 50[%] under voltage sag compensation

그림 8은 50[%]미만의 전압 sag 보상을 위한 동작 상태를 나타낸다. 상위 컨버터는 입력 전압  $v_i$ 에 대하여 동상의 출력 전압  $va1$ 을 출력하고, 하위 컨버터는 역상의 출력 전압  $vb1$ 을 출력하고 있으며 이 두 전압의 합인 ( $va1+vb1$ )는 가극성 결합 변압기를 통하여 최종 보상 전압 ( $va2+vb2=v_{sag1}$ )으로 나타난다. 그림 7에서 보는 바와 같이 전압 보상시 변압기 1차측의  $va1$ ,  $vb1$ 에 의하여 2차측 전압 ( $va2+vb2$ )가 유기 되는 전류의 방향 때문에 가극성 결합 변압기를 사용하여야 한다.

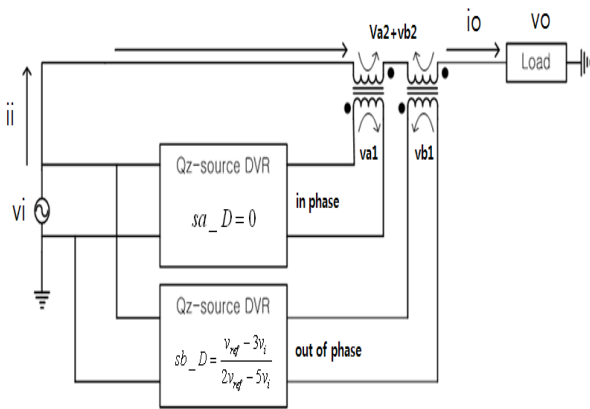


그림 8 50[%]미만의 전압 sag 보상을 위한 동작 상태  
 Fig. 8 Operation state for the 50[%] under voltage sag compensation

2.2.2 Sag Mode - 2와 Sag Mode - 3

그림 9는 50~65[%] (Sag Mode-2)와 66~77.5[%] (Sag Mode-3) 전압 sag보상을 위한 순서도를 나타낸다. 전압 변동을 검출한 결과 50[%]이상의 전압 sag로 판단이 되면, 기준 전압  $v_{ref}$ 에서 전압 sag가 발생된 입력 전압  $v_i$ 와의 차를 구하여 보상 전압  $v_{sag2,3}$ 을 구한다. 보상 전압

$v_{sag2,3}$ 과 기준 전압  $v_{ref}$  그리고 입력 전압  $v_i$ 을 비교하여 보상 전압  $v_{sag2}$ 를 출력하는 Sag Mode-2와 보상전압  $v_{sag3}$ 를 출력하는 Sag Mode-3를 판별하고, 각 mode에 맞게 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비  $sa_D$ ,  $sb_D$ 를 계산한다.

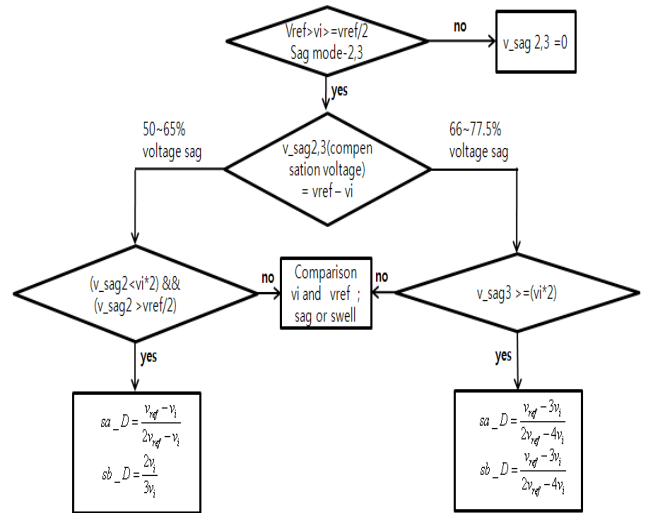


그림 9 50~65[%]와 65~77.5[%] 전압 sag보상을 위한 순서도  
 Fig. 9 Flowchart for the 50~65[%] and 65~77.5[%] voltage sag compensation

그림 10과 그림 11은 각각 50~65[%] 전압 sag 보상과 66~77.5[%] 전압 sag보상을 위한 동작 상태를 나타낸다. 상위 컨버터는 동상의 출력 전압  $va1$ 을 출력하고, 하위 컨버터는 역상의 출력 전압  $vb1$ 을 출력하여 가극성 결합 변압기를 통하여 ( $va2+vb2$ )을 발생하고 있다. 그림 11에서 보는 바와 같이 Sag-Mode 3의 경우, 결합 변압기의 2차측 최종 보상 전압의 유도방향은 Sag Mode-1과 Sag Mode-2와는 다르게 서로 동일한 방향이다.

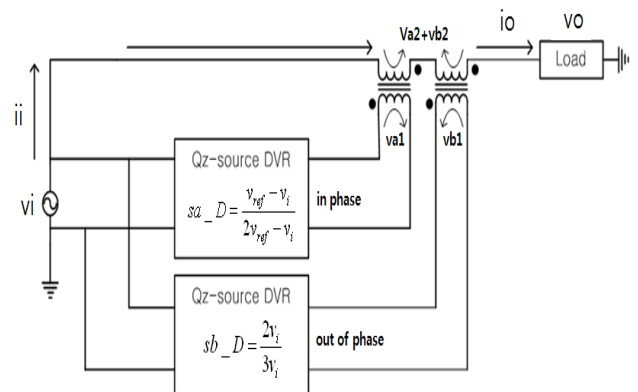


그림 10 50~65[%] 전압 sag 보상을 위한 동작 상태  
 Fig. 10 Operation state for the 50~65[%] voltage sag compensation

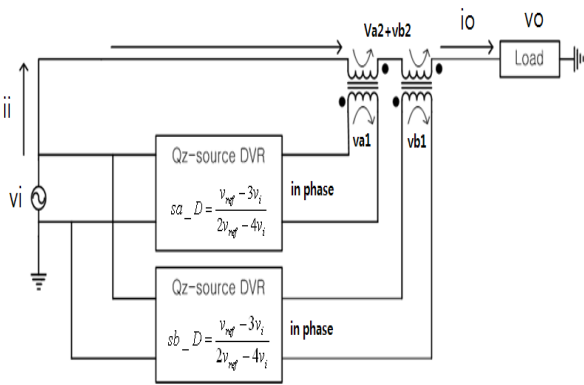


그림 11 66~77.5%의 전압 sag 보상을 위한 동작 상태  
 Fig. 11 Operation state for the 66~77.5% voltage sag compensation

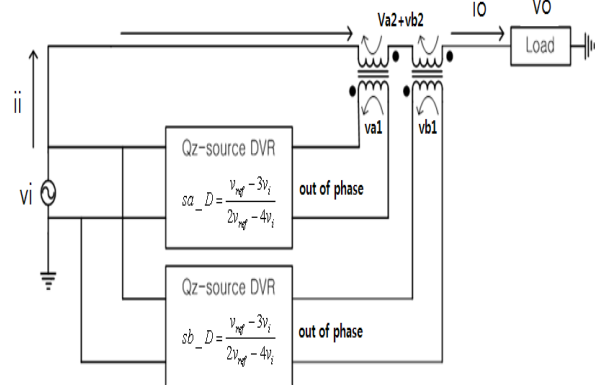


그림 13 0~100% 전압 swell을 위한 보상 상태  
 Fig. 13 Operation state for the 0~100% voltage swell compensation

### 2.2.3 Swell Mode

그림 12는 0~100%범위의 전압 swell에 대한 보상 순서도를 나타내고 있다. 전압 변동을 검출하여 전압 swell로 판단이 되면, 기준 전압 vref에서 전압 swell이 발생된 입력 전압 vi의 차이로 부터 보상 전압 v\_swell을 얻을 수 있다. 오류 방지를 위하여 보상 전압 v\_swell이 0과 비교하여 전압 swell 발생되었는지 한번 더 판별한 후, 상위 컨버터와 하위 컨버터의 듀티비 sa\_D, sb\_D를 수식에 의하여 계산한다.

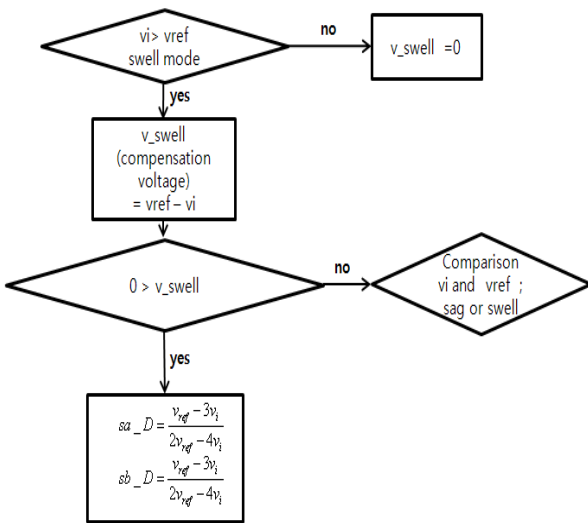


그림 12 0~100% 전압 swell 보상을 위한 순서도  
 Fig. 12 Flowchart for the 0~100% voltage swell compensation

그림 13은 0~100% 전압 swell을 위한 보상 동작 상태를 나타내고 있다. 상위 컨버터의 역상 모드 출력 전압 va1과 하위 컨버터의 역상 모드 출력 전압 vb1으로 부터 (va1+vb1)을 구하고, 이를 가극성 결합 변압기를 통하면 최종 보상전압 (va2+vb2)이 발생된다. 이 경우, Sag Mode-3와 같이 각 컨버터의 변압기 2차측 유도 전압 방향은 서로 동일하다.

### 3. 사례 고찰

그림 14는 제안된 시스템의 PSIM 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다. 시뮬레이션에 사용된 quasi Z-소스 네트워크의 인덕터는 모두 L1 = L2 = L3 = L4 = 1[mH]이며, 등가 손실 저항은 각각 0.5[Ω]이며 또한 커패시터는 C1 = C2 = C3 = C4 = 6.6[uF]이다. 입력 전압은 6.6[kV]/60[Hz]이며 부하는 저항 R = 30[Ω]이다. Quasi Z-소스 AC/AC컨버터의 스위칭 소자는 IGBT를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 fsw=20[kHz]이다. 또한 상위-하위 컨버터 출력단의 가극성 결합 변압기의 변압비는 1:1이고 출력 필터는 Lf1 = Lf2 = 2[mH], Cf1 = Cf2 = 10[uF]이며, 각 스위칭 소자의 R-C스너버 소자는 Rs=0.1[Ω], Cs=0.01[uF]로 하였다.

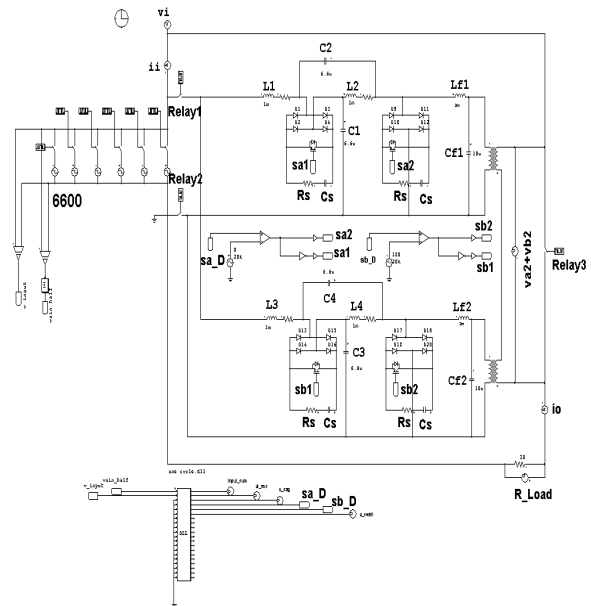


그림 14 PSIM 시뮬레이션 모델  
 Fig. 14 PSIM simulation model

표 1 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Simulation parameters

Input voltage		6.6[kV]/ 60[Hz]
Quasi Z-source network	L1=L2=L3=L4	1[mH]
	C1=C2=C3=C4	6.6[uF]
Transformer turn ratio(Additive polarity)		1:1
Switching device		IGBT
Switching frequency fsw		20[kHz]
R-C Snubber	Rs	0.1[Ω]
	Cs	0.01[uF]
L-C filter	Lf1=Lf2	2[mH]
	Cf1=Cf2	10[uF]
Inductor resistance r		0.5[Ω]
Load	R	30[Ω]

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여, 계통 전압에 10[%], 20[%], 60[%]의 전압 sag와 10[%], 20[%], 60[%]의 전압 swell 그리고 10[%]에서 20[%]의 전압 sag-swell이 연속적으로 발생하는 경우에 대한 PSIM 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 그림 15는 0.2~0.4[S]사이에서 발생한 20[%]의 전압 sag에 대한 Sag Mode-1에 대한 보상 결과를 나타내고 있다. 그림 15에서 보는 바와 같이 상위 컨버터의 듀티비 sa\_D=0인 상태에서 sb\_D는 식(5)로 결정되며, 이 경우 최종 보상 전압 (va2+vb2)는 전원 전압과 동상 전압임을 알 수 있다. 제안된 방법으로 중전압의 보상기[10]의 보상 불가능한 영역인 50[%]미만의 전압 sag가 보상 가능함을 알 수 있다.

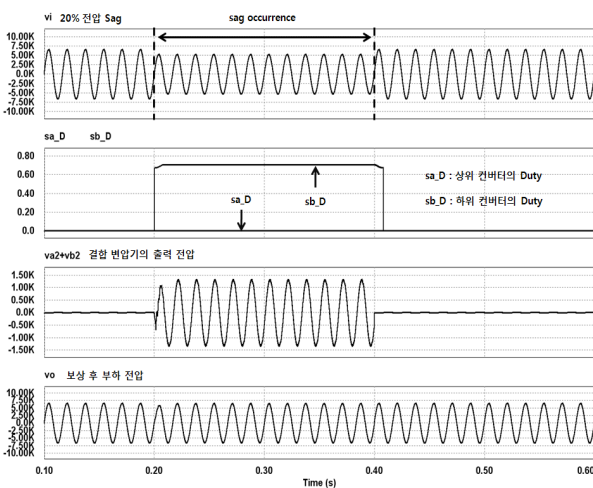


그림 15 20%의 전압 sag에 대한 보상 결과 (Sag Mode-1)  
Fig. 15 Compensation result for the 20% voltage sag(Sag Mode-1)

그림 16은 50[%]이상의 전압 sag발생에 대한 보상 모드인 Sag Mode-2의 보상 결과이다. 0.2~0.4[S]구간에서 60[%] sag가 발생되며, sag가 발생하는 첫 반주기에서는 심

각한 sag로 인하여 충분한 보상 전압을 발생하지 못하고 있다. 실제 산업 현장에 있어서 전압 sag는 50[%]미만의 경우가 대부분이므로, Sag Mode-2나 Sag Mode-3에 대한 이와 같은 초기 반주기의 오차는 큰 문제라 할 수 없다. 이 경우, 상위 듀티비 sa\_D와 하위 컨버터 sb\_D는 식 (8)과 식(10)으로 결정되고 있으며, sa\_D는 sb\_D보다 절반 정도 적음을 알 수 있다.

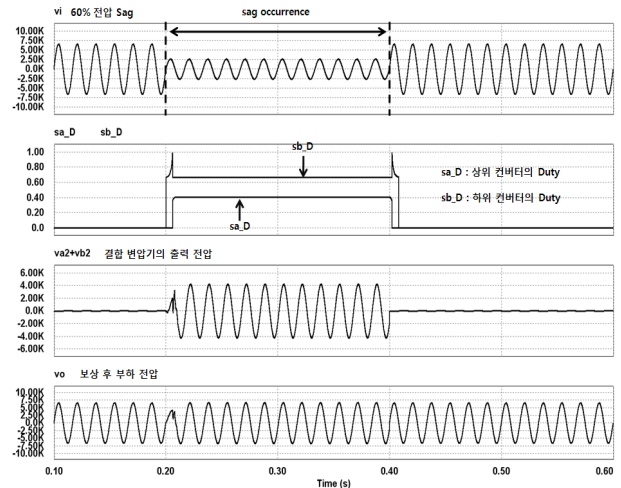


그림 16 60%의 전압 sag에 대한 보상 결과(Sag Mode-2)  
Fig. 16 Compensation result for 60% voltage sag(Sag Mode-2)

그림 17은 전압 sag보상을 위한 상 하위 컨버터의 D(sa\_D, sb\_D)의 변화를 나타 것이다. 전압 sag가 0~40[%]범위에서 발생할 때는 상위 컨버터의 sa\_D는 0이며 하위 컨버터의 sb\_D는 0.6~0.8사이로 증가한다. 그러나 전압 sag가 40[%]이상으로 되면, sa\_D는 0.2를 향하여 감소하며, sb\_D 역시 0.2를 향하여 증가하다가 감소한다. 전압 sag가 70[%]가 되면 sa\_D와 sb\_D는 0.2로 동일해진다.

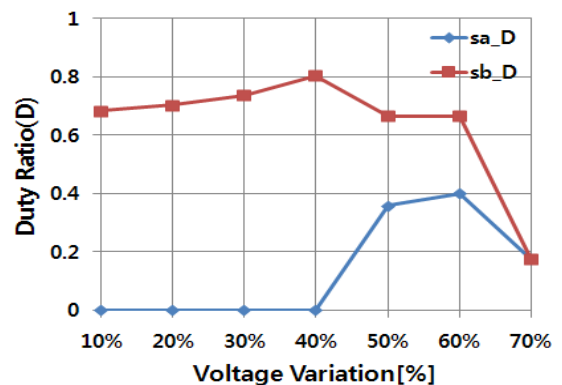


그림 17 전압 sag 보상에 대한 상 하위 컨버터의 듀티 비 D (Load=30[Ω])  
Fig. 17 Duty ratio D of the upper-lower converters for the voltage sag compensation (Load=30[Ω])

그림 18과 19는 20[%]의 전압 swell과 60[%]의 전압 swell에 대하여 제안된 방법의 Swell Mode의 보상 결과를 나타낸다. 이 모드에서, 상위 컨버터 sa\_D와 하위 컨버터의 sb\_D는 식 (18)과 식(20)에서 보는 바와 같이 서로 동일하다. 그림에서 보듯이 Sag Mode와는 다르게, swell이 발생되는 첫 반주기를 비롯하여 전 구간에서 보상 성능이 모두 우수함을 알 수 있다.

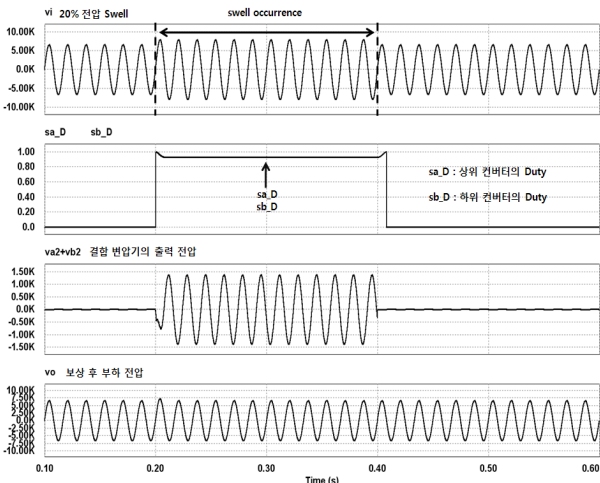


그림 18 20%의 전압 swell에 대한 보상 결과(Swell Mode-1)  
 Fig. 18 Compensation result for 20% voltage swell(Swell Mode-1)

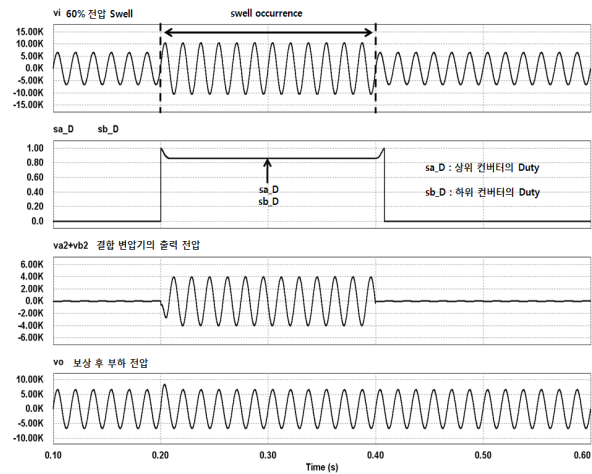


그림 19 60%의 전압 swell에 대한 보상 결과(Swell Mode-2)  
 Fig. 19 Compensation result for 60% voltage swell(Swell Mode-2)

그림 20은 전압 swell보상을 위한 상 하위 컨버터의 D(sa\_D, sb\_D)를 나타내고 있으며, 이미 그림 18~19에서 나타낸 바와 같이, 전압 swell의 발생 범위와 무관하게 sa\_D와 sb\_D는 서로 동일한 값을 갖고 있다.

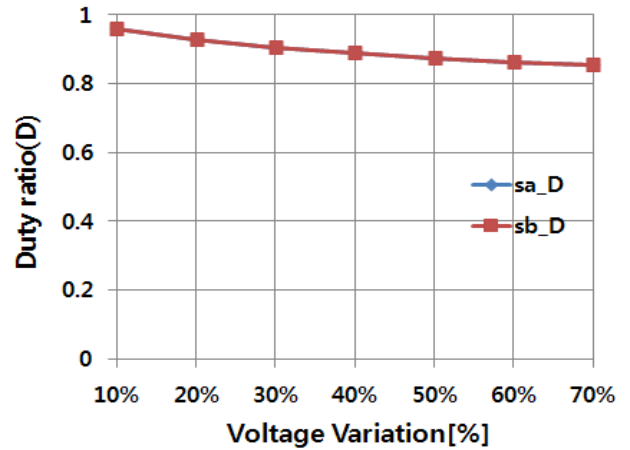


그림 20 전압 swell 보상에 대한 상 하위 컨버터의 듀티 비 D (Load=30[Ω])  
 Fig. 20 Duty ratio D of the upper-lower converters for the voltage swell compensation (Load=30[Ω])

그림 21과 그림 22는 산업 현장에서 실제 발생 가능한 20[%]미만의 전압 sag와 전압 swell이 연속해서 발생한 경우에 대한 보상 결과이다. 전압 sag의 경우 모두 20[%]미만 발생되므로 Sag Mode-1에 해당되며, 이때 상위 컨버터의 듀티 비 sa\_D=0이고, 하위 컨버터의 sb\_D는 식(5)으로 결정된다. Swell은 Swell Mode 1,2로 동작되므로 상위/하위 컨버터는 식 (18)과 (20)으로 구해진 듀티비 sa\_D, sb\_D로 스위칭 하고 있다. 그림 21과 그림 22에서 보는 바와 같이, 연속적인 sag와 swell이 발생하는 경우라도 보상이 양호함을 알 수 있다.

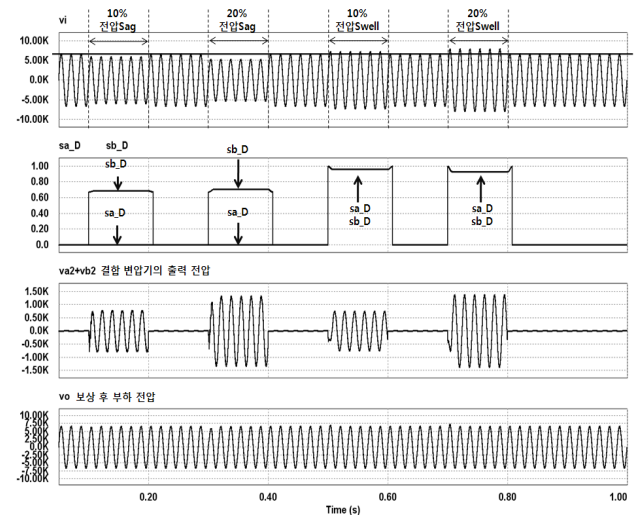


그림 21 연속 전압 sag와 연속 전압 swell에 대한 보상 결과(1)  
 Fig. 21 Compensation results (1) for the continuous voltage sag and voltage swell



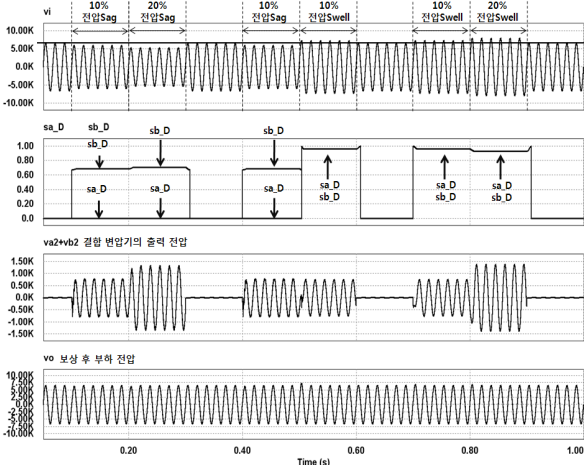


그림 22 연속적인 전압 sag-swell에 대한 보상 결과(2)  
 Fig. 22 Compensation results(2) for the continuous voltage sag-swell

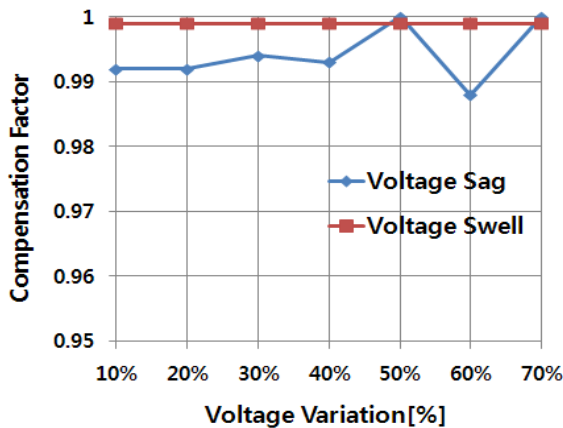


그림 23 전압 변동에 대한 전압 보상율(Load=30[Ω])  
 Fig. 23 Voltage compensation factor for different voltage variation(Load=30[Ω])

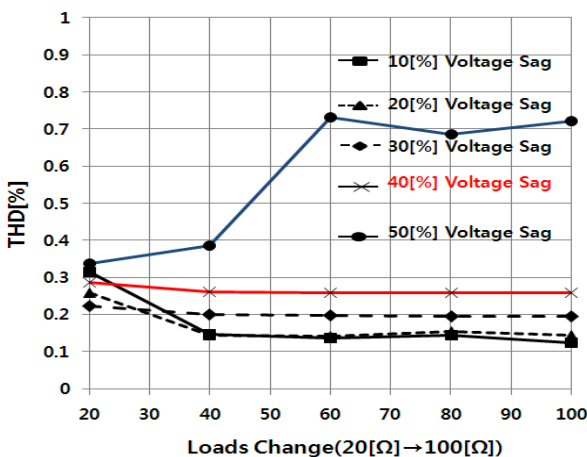


그림 24 부하 변동과 전압 sag에 대한 보상 후 sag 전압의 THD[%]  
 Fig. 24 Compensated voltage THD[%] according to the loads change(20[Ω]→100[Ω]) and voltage sags

그림 23은 전압 sag와 swell의 변화에 따른 전압 보상율을 나타낸다. 전압 보상율 1은 보상장치에 의하여 전압 변동 발생 전의 원래 전압으로 100[%] 회복된 것을 의미한다. Swell의 경우에는 거의 100[%]에 가깝게 회복되고 있으나, sag는 전 구간에 대하여 약간 부족한 회복이 존재하고 있음을 알 수 있다

그림 24는 부하 변동과 전압 sag에 대해 보상된 전압의 THD[%]를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 출력이 작고(큰 부하저항) 전압 sag가 50[%]에 가까울수록 보상 후 전압의 THD는 증가함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 6.6[kV]/60[Hz]의 배전 계통에서 발생하는 전압 변동을 보상하기 위한 출력을 직렬로 연결한 quasi Z-소스 DVR시스템을 제안하였다. 종전의 1개의 quasi Z-소스 AC-AC 컨버터를 이용한 보상은 배터리와 같은 별도의 에너지 저장장치가 필요 없이 전압 변동을 보상하는 장점을 가지고 있지만, 전압 sag가 정상 전압의 50[%]미만 발생하는 경우에는 보상이 불가능하였다. 그러나 quasi Z-source AC/AC 컨버터 2대의 출력 단을 직렬로 연결한 제안된 방법은 buck-boost모드의 듀티비 D를 이용하여, 상위/하위 컨버터를 개별 제어하여서 이상의 문제점을 해결하였다. 제안된 시스템의 사례 검증을 위하여 PSIM 시뮬레이션을 하였다. 그 결과, 계통 전압에서 10[%], 20[%], 60[%]의 전압 sag와 전압 swell이 발생하는 경우와 50[%]미만의 전압 sag와 전압 swell이 연속적으로 발생하는 경우에 대하여 모두 보상 가능함을 확인할 수 있었다. 특히 10[%]-50[%]까지 다양한 전압 sag발생과 부하 변동에 대하여 보상 후 전압의 THD를 살펴본 결과, 출력이 작고(큰 부하저항) 전압 sag가 클수록 보상 후 전압의 THD가 증가하였다. 또한 전압 보상은 sag보다는 swell의 경우에 더 높았으며, 부하 저항과 무관하게 거의 1에 근접함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 논문 또는 저서는 2011년 교육과학기술부(지역 거점연구단육성사업/바이오하우징연구사업단)와 바이오하우징연구소 및 "지식경제부", "한국산업기술진흥원", "호남광역경제권 선도산업지원단"의 "광역경제권 선도산업 육성사업"으로 수행된 연구결과입니다.

#### 참 고 문 헌

[1] Eric John, "Experience with a Static Series Compensation Device(DVR) at a Semiconductor Facility", ABB Power T&D Company Inc., April 1999.  
 [2] D. Mahinda Vilathgamuwa et al, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans., Power Delivery, Vol.18, No.3, pp.928-936, July 2003.

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

[4] 전영환, 김지원, 전진홍, "직렬 전압 주입에 의한 순간 전압 강하 보상기기에 관한 연구", 한국에너지공학회지, Vol. 10, No. 4, pp.310-317, 2001.

[5] 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.

[6] 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, 1999, pp. 873-878.

[7] 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, 2005, pp. 896-903.

[8] 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, 2006, pp. 2242-2248.

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

[10] 이기택, 정영국, 임영철, "단상 Quasi Z-소스 동적 전압 보상기", 전력전자학회 논문지, Vol. 15, No. 4, pp.327-334, 2010.

저 자 소 개



**엄준현 (嚴俊鉉)**

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

Tel : 062-530-0852

E-mail : delete47@nate.com



**정영국 (鄭榮國)**

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학교 연구방문. 현재 대불대학교 융합기술학부 부교수.

Tel : 061-469-1263

E-mail : jyg@db.ac.kr



**임영철 (任永徹)**

1953년 4월 23일생. 1975년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1977년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 호주 모나시 대학교 Visiting Scholar. 1998~2007년 산업자원부 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터 소장. 현재 전남대학교 전기공학과 교수.

Tel : 062-530-1743

E-mail : yclim@chonnam.ac.kr



**최준호 (崔竣豪)**

1970년 7월 30일생. 1996년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 062-530-1742

E-mail : joono@chonnam.ac.kr