변압기 기반 3상 전압변동발생기의 전압강하 특성해석

韓興洙^{*}, 李映濤^{**}, 宋雄俠^{***}, 魯義哲[†], 金仁東^{****}, 金興根[§], 全泰園^{§§}

Analysis of Voltage Drop Characteristics of Transformer-based 3-phase Voltage Disturbance Generator

Heung-Soo Han, Young-Ho Lee, Woong-Hyub Song, Eui-Cheol Nho, In-Dong Kim,
Heung-Geun Kim, and Tae-Won Chun

요 약

본 논문에서는 변압기 기반 전압변동 발생기의 직렬변압기에 의한 전압강하 특성을 분석하였다. 전압변동 발생기의 회로구성 방식에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 비교적 비용이 저렴하고 신뢰도가 높은 직렬변압기를 사용한 방식에 대해 다루고자 한다. 직렬변압기에 의한 전압강하는 변압기의 %Z와 부하용량 및 부하역률에 의해 결정된다. 직렬변압기의 설계가 잘못되면 전압강하가 심각하게 발생하여 제대로 된 성능을 확보할 수 없다. 본 논문에서는 10kVA급 전압변동 발생기에 대해 %Z가 4%인 직렬변압기를 사용한 경우 부하역률에 따른 전압강하를 분석하였으며 지상 부하일수록 전압강하가 증가하고 역률이 0.85 이상인 경우 전압강하가 4% 발생함을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

A voltage drop characteristics of a transformer-based voltage disturbance generator with series transformers is analysed. It is well known that a voltage disturbance generator with series transformer is cost-effective and reliable compared with other types. The voltage drop depends on the %Z of the transformer, power rating, and output power factor. A wrong design of the transformer results in a severe voltage drop, which can not guarantee the proper performance of the generator. The voltage drop is analysed under the condition of 10kVA output power rating and 4% of %Z with the variation of power factor. It is found through simulations and experiments that the drop increases as the power factor decreases in lagging mode, and the drop is 4% of the rated voltage in case of 0.85 lagging power factor.

Key Words : Voltage disturbance generator, Series transformer, Voltage drop

1. 서 론

최근 순간 정전, 순시전압강하 등에 의한 전력품질 외란으로 인하여 각종 시스템이 오작동하는 사례가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 사고를 예방하기 위하여 다양한 전력 품질 개선 방안들이 제시되어 사용되고 있다. 대표적으로 정전 및 전압변동에 대응하기 위해 UPS가 널리 사용되고 있고 최근에는 고전압 대전류

[†]교신저자 : 정회원, 부경대 전기공학과 교수
E-mail : nhoec@pknu.ac.kr

^{*}정회원, 부경대 대학원 전기공학과 박사과정

^{**}정회원, LG전자 AC사업부 연구원

^{***}정회원, 부경대 대학원 전기공학과 석사과정

^{****}정회원, 부경대 전기공학과 교수

[§]정회원, 경북대 전기공학과 교수

^{§§}정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

접수일자 : 2010. 7. 22 1차 심사 : 2010. 8. 10

심사완료 : 2010. 9. 6

제어기기인 Custom Power Devices에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하지만 이러한 장비를 테스트하기 위해서는 새그(Sag), 스웰(Swell), 순간정전 등의 전원 변동을 발생시켜 줄 수 있는 장치가 필요하나, 기존의 장치는 고가이고 취급이 용이하지 않다^[1,2]. 이러한 단점을 극복하기 위해 최근 새로운 방식의 전압 변동 발생 장치가 제안되었다^[3-7].

일반적으로 전압변동발생기는 증폭기 기반, 변압기 기반, 스위칭 임피던스 기반, 발전기 기반의 4가지 방식으로 분류된다^[8]. 이 중에서 가장 경제적 구현이 가능한 방식은 변압기 기반 전압변동 발생기이다. [3]의 방식은 전압 새그나 스웰 또는 순간정전 발생시 과도한 무효전력을 필요로 하고 별도의 노치필터가 필요하다는 등의 단점이 있어 이러한 단점을 극복하기 위하여 [4-7]의 방식이 제안되었다. [4-7]에서 제안된 방식은 [3]보다도 그 구조가 간단하며 효율과 신뢰성 또한 높다는 특징이 있다. 그런데 직렬변압기 사용으로 인한 전압강하가 발생하여 직렬변압기 설계시 주의가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 [4-7]에서 사용하고 있는 직렬변압기에 의한 전압강하를 부하역률 변화에 따라 분석함으로써 저렴한 비용으로 구현이 가능한 전압 변동 발생기의 성능을 확보하는데 기여하고자 한다.

2. 전압변동발생기 특성해석

2.1 전압변동발생기 동작원리

그림 1은 SCR 사이리스터와 직렬변압기를 사용하는 방식의 3상 전압변동발생기 회로를 나타낸다. 임의의 전압변동을 발생하기 위하여 전원전압(V_a - V_c)과 출력단자(V_{as} - V_{cs}) 사이에 각각 직렬변압기를 삽입하였다. S_{a1} , S_{a2} , S_{b1} , S_{b2} , S_{c1} , S_{c2} 는 직렬변압기 1차측에 원하는 양의 전압변동을 인가하기 위하여 전원 전압의 일부를 미끄럼 방식 단권변압기(슬라이더) 2차측으로부터 직렬변압기에 연결하는 역할을 한다. S_{Ba1} , S_{Ba2} , S_{Bb1} , S_{Bb2} , S_{Bc1} , S_{Bc2} 는 정상모드 동작시 입력 상전압을 그대로 출력하기 위하여 직렬변압기 2차측을 단락시키는 역할을 한다. 표 1은 그림 1의 회로에서 출력 전압 V_{as} 가 정상, 새그, 스웰, 순간정전의 모드로 동작하기 위한 SCR 사이리스터의 온/오프 상태와 슬라이더의 접점위치를 나타낸 것이다.

표 1과 같이 SCR 사이리스터의 적절한 온/오프 동작에 의해 다양한 전압변동을 발생시킬 수 있다^[4]. 단, SCR로 구성되는 폐회로의 단락사고를 방지하기 위해 SCR 사이리스터의 온/오프 시점을 고려해야 한다.

그림 1 3상 전압변동발생기

Fig. 1 3-phase voltage disturbance generator

표 1 전압변동에 따른 스위치상태와 Ta-접점 위치 (a-상)
Table 1 Each switch operating condition and Ta-contact point (a-phase)

V_{as}	S_{a1}, S_{a2}	S_{Ba1}, S_{Ba2}	Ta접점 위치
정상	OFF	ON	-
새그	ON	OFF	I-구간하단
스웰	ON	OFF	II-구간
순간정전	ON	OFF	I-구간상단

2.2 직렬변압기 전압강하

그림 1에서 3상 각각의 동작원리는 동일하므로 a-상에 대하여 분석하고자 한다.

정상모드 동작시 S_{Ba1} - S_{Ba2} 가 턴온되어 있고 S_{a1} 과 S_{a2} 는 모두 턴오프되어 있다. S_{Ba1} 과 S_{Ba2} 가 턴온되어 있으면 직렬변압기 T의 2차측에 단락회로가 형성되어 이상적인 경우 직렬변압기의 1차측도 단락되어 전원전압 V_a 가 출력 V_{as} 로 나타난다. 그러나 실제로는 직렬변압기와 SCR 사이리스터의 임피던스가 존재하므로 이 임피던스에 의한 전압강하가 발생한다. 이러한 전압강하를 분석하기 위하여 a-상에 대한 등가회로를 그리면 그림 2와 같다.

그림 2에서 R_1 , R_2 는 각각 직렬변압기 1차 및 2차측 권선저항, $L_{\ell 1}$, $L_{\ell 2}$ 는 1차 및 2차측 누설 인덕턴스, R_c 는 코어철손, L_m 은 자화 인덕턴스를 의미한다. 그런데

$$R_c / \omega L_m \gg |R_2 + j\omega L_{\ell 2} + V_T| \quad (1)$$

그림 2 정상모드에서의 a-상 등가회로
Fig. 2 a-phase equivalent circuit in normal mode

그림 3 간소화된 a-상 등가회로
Fig. 3 Simplified a-phase equivalent circuit

그림 4 부하역률이 1인 경우 전압 전류
페이저도
Fig. 4 Voltage and current phasor diagram
in case of load PF=1

이므로 R_c 와 L_m 은 무시할 수 있다. 여기서 V_T 는 SCR 사이리스터의 전압강하를 의미한다. 따라서 그림 2는 그림 3과 같이 간소화할 수 있다.

이상에서 직렬변압기에 의한 전압강하는 변압기 1, 2차측의 권선저항(R_1, R_2), 누설인덕턴스($L_{\ell 1}, L_{\ell 2}$), 그리고 SCR 사이리스터($S_{Ba1}-S_{Ba2}$)에 의해 발생함을 알 수 있다. 따라서 정상모드 동작시 a-상의 출력전압 V_{as} 는 다음과 같다.

$$V_{as} = V_a - i_a(R_1 + j\omega L_{\ell 1} + R_2 + j\omega L_{\ell 2}) - V_T \quad (2)$$

식 (2)에 대하여 부하역률이 1인 경우를 페이저도로 나타내면 그림 4와 같다.

그림 4에서 $R = R_1 + R_2$, $L_{\ell} = L_{\ell 1} + L_{\ell 2}$ 이다.

전원전압 V_a 와 출력전압 V_{as} 의 크기 차이를 $V_{d\theta 0}$ 라 하면, $V_{d\theta 0}$ 는 다음식과 같다.

$$V_{d\theta 0} = \sqrt{(V_{as} + V_T + i_a R)^2 + (\omega L_{\ell} i_a)^2} - V_{as} \quad (3)$$

부하역률이 지상인 경우에 두 전압의 차이 $V_{d\theta n}$ 을 구하면 다음과 같다.

$$V_{d\theta n} = \sqrt{(V_{as} + A + B)^2 + (C - D)^2} - V_{as} \quad (4)$$

식 (4)에서 A, B, C, D는 각각 다음과 같다.

$$A = (V_T + i_a R) \cos \theta \quad (5)$$

$$B = \omega L_{\ell} i_a \sin \theta \quad (6)$$

$$C = \omega L_{\ell} i_a \cos \theta \quad (7)$$

$$D = (V_T + i_a R) \sin \theta \quad (8)$$

여기서, θ 는 부하역률 각을 의미한다.

부하역률이 진상인 경우의 두 전압 차 $V_{d\theta p}$ 는 다음과 같다.

$$V_{d\theta p} = \sqrt{(V_{as} + A - B)^2 + (C + D)^2} - V_{as} \quad (9)$$

본 논문에서 다루고자하는 전압변동 발생기의 용량은 10kVA이며 여기에 사용된 직렬변압기의 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 변압기 파라미터
Table 2 Transformer Parameter

파라미터	값
권선저항($R_1 + R_2$)	0.1 Ω
누설인덕턴스($L_{\ell 1} + L_{\ell 2}$)	0.447 mH
퍼센트 임피던스(%Z)	4 %

표 2의 변압기 파라미터를 이용하여 저항부하 (PF=1.0), 지상 및 진상 부하(PF=0.85)에서 부하용량이 0kVA ~ 10kVA까지 증가할 때 출력전압 V_{as} 의 전압강하를 나타내면 그림 5와 같다. 이때 SCR($S_{Ba1}-S_{Ba2}$)에 의한 전압강하(V_T)는 1V로 가정하였다.

정상 동작 모드시 10kVA 부하에서 PF=1.0인 저항 부하일 경우 출력전압에는 3.3V의 전압강하가 발생한다. 이때 $S_{Ba1}(S_{Ba2})$ 사이리스터에 의한 전압강하(V_T)가 1V이므로 실제로 직렬변압기에 의한 출력전압의 전압강하는 2.6V이다. 그리고 부하가 지상부하의 경우 전압강하가 5.1V로 가장 크게 나타나고 진상부하일 경우 0.72V로 가장 작게 나타난다. 이는 시뮬레이션 결과인 표 3과도 일치함을 확인할 수 있다.

그림 5 부하역률 및 부하용량에 따른 전압강하
Fig. 5 Voltage drop with the variation of PF and output power

3. 시뮬레이션 결과

그림 1의 회로에 대한 시뮬레이션 결과는 그림 6-8과 같다. 그림 1의 직렬변압기 파라미터는 표 2의 값을 사용하였다. 그림 6은 부하역률이 1.0인 경우 10kVA 부하에 대한 전원전압 V_a 와 출력전압 V_{as} 를 나타낸다. 그림 6(a)는 1주기를 나타내었고 그림 6(b)는 각 전압의 피크값 주위를 확대하여 나타낸 것이다.

(a) V_a , V_{as} , I_a

(b) V_a , V_{as} 확대파형

그림 6 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=1.0)
Fig. 6 Source voltage(V_a) and output voltage(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=1.0)

(a) V_a , V_{as} , I_a

(b) V_a , V_{as} 확대파형

그림 7 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=0.85 지상)

Fig. 7 Source voltage(V_a) and output voltage(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=0.85 lagging)

(a) V_a , V_{as} , I_a

(b) V_a , V_{as} 확대파형

그림 8 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=0.85 진상)

Fig. 8 Source voltage(V_a) and output voltage(V_{as}) ($P_o=10$ kVA, PF=0.85 leading)

그림 7과 8은 각각 부하역률이 0.85(지상), 0.85(진상)인 경우를 나타낸다. 각 경우에 V_a 와 V_{as} 의 전압차와 위상차는 표 3과 같다. 표 3에 나타낸 V_a 와 V_{as} 의 전압차(실효값)는 그림 5의 계산값과 일치함을 알 수 있다.

표 3 V_a 와 V_{as} 의 전압차와 위상차

Table 3 Voltage and phase differences of V_a and V_{as}

부하역률	전압크기차이($ V_a - V_{as} $) [V]	위상차
1.0	3.3	0°
0.85(지상)	5.1	-32°
0.85(진상)	0.72	$+32^\circ$

4. 실험결과

그림 1의 회로를 구성하여 실험한 결과 파형은 그림 9~10과 같다.

그림 9는 부하역률이 1.0이고 부하용량이 10kVA인 경우의 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) 파형을 나타낸다. 그림 9(b)에서 보듯이 V_a 의 최대값과 V_{as} 의 최대값의 차이는 3.2 Vrms로서 그림 6의 시뮬레이션 결과와 거의 일치함을 알 수 있다.

(a) V_a , V_{as} , I_a (100 [V]/div, 2[ms]/div)

(b) V_a , V_{as} 확대파형 (20 [V]/div, 500[us]/div)

그림 9 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) 실험파형 (PF=1.0)

Fig. 9 Experimental waveform of V_a and V_{as} (PF=1.0)

(a) V_a , V_{as} , I_a (100 [V]/div, 2[ms]/div)

(b) V_a , V_{as} 확대파형 (20 [V]/div, 500[us]/div)

그림 10 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) 실험파형 (PF=0.85 지상)

Fig. 10 Experimental waveform of V_a and V_{as} (PF=0.85 lagging)

그림 10은 부하역률이 0.85 지상인 경우의 전원전압(V_a)과 출력전압(V_{as}) 파형을 나타낸다. 실험결과는 그림 7의 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력품질 개선장치의 성능 테스트를 위해 제안된 3상 전압변동 발생기의 직렬변압기에 의한 전압강하 특성을 해석하였다. 직렬변압기의 등가회로와 파라미터를 이용하여 전압강하 크기를 계산하였으며 시뮬레이션을 통해 그 크기를 확인하였다. 전압강하가 가장 심하게 발생하는 최악의 조건은 지상부하에서 역률이 가장 낮을 때임을 알 수 있었으며 10kVA 0.85 지상부하시 5.1V의 전압강하가 발생한다. 이것은 전원전압의 4%에 해당한다. 따라서 직렬변압기에 의한 전압 강하가 전원전압의 4% 정도를 허용하는 경우에는 제안한 전압변동발생기를 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 사용한 직렬변압기의 %Z는 4%인데 %Z가 증가할수록 전압강하는 증가하므로 변압기의 %Z를 고려하여 전압변동 발생기를 설계할 필요가 있

다. 본 논문에서의 분석 결과는 전압변동 발생기 뿐 아니라 DVR 등 직렬변압기를 사용하는 시스템의 설계에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2007-P-EP-HM-04-0000)

참 고 문 헌

- [1] Power Standards Lab. "Industrial Power Corruptors standard power quality disturbance generators", 2003.
- [2] Elgar electronics Co., "Smart wave Switching amplifier operation manual", 2002.
- [3] Y. H. Chung, G. H. Kwon, T. B. Park, and G. Y. Lim, "Voltage Sag and Swell generator with thyristor controlled rectifier", *IEEE Power Con*, Vol. 3, pp. 1933-1937, 2002.
- [4] E.C. Nho, I.D. Kim, T.W. Chun, H.G. Kim, "Cost-effective power quality disturbance generator for the performance test of custom power devices", *Proceedings of IEEE-IECON*, pp. 1606-1610, 2004.
- [5] 변우열, 김중원, 이기수, 노의철, 김인동, 전태원, 김홍근, "다이나믹 UPS 시스템의 전력품질 외란발생을 위한 전압 Sag-Swell 발생기", *전력전자학회 논문지*, Vol. 10, No. 1, pp. 102-107, 2005.
- [6] 이병철, 최성훈, 팽성환, 박성대, 노의철, 최남섭, 김인동, 전태원, 김홍근, "위상급변 기능을 갖는 3상 전력품질 외란발생기", *전력전자학회 논문지*, Vol. 11, No. 5, pp. 463-470, 2006.
- [7] 노의철, 박성대, 김인동, "선형 및 비선형 부하에 적용 가능한 3상 전압변동 발생기의 스위칭 특성 해석", *전력 전자학회 논문지*, Vol. 13, No. 3, pp. 163-170, 2008.
- [8] Yan Ma and George G. Karady, "A single-phase voltage sag generator for testing electrical equipments", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-5, 2008.

저 자 소 개

한홍수(韓興洙)

1958년 11월 10일생. 1998년 부경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 동 대학원 박사과정.

이영호(李映濤)

1980년 4월 26일생. 2007년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년 부경대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 LG전자 AC사업부 연구원.

송웅협(宋雄俠)

1983년 6월 30일생. 2009년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년~현재 부경대 대학원 전기공학과 석사과정.

노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 학술위원장.

김인동(金仁東)

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학박사). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 2004~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 기획이사.

김홍근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년, 1988년 동 대학원 전기공학과(석사, 공박). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin - Madison 방문교수. 2006년~2007년 미국 Michigan State University 방문교수. 현재 경북대 전기공학과 교수. 당 학회 경상지부장.

전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1997년 Tennessee 대학 방문교수. 2005년~2006년 미국 Virginia Tech 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 부회장.