

초전도 에너지 저장 장치용 3상 사이리스터 브리지의 비대칭 제어에 관한 연구

김승현¹ · 김무현² · 이성근³ · 김윤식[†]

(Received September 19, 2018 ; Revised March 7, 2019 ; Accepted May 1, 2019)

Asymmetric control of a three-phase thyristor bridge for superconducting magnetic energy storage

Seung-Hyun Kim¹ · Mu-Hyeon Kim² · Sung-Geun Lee³ · Yoon-Sik Kim[†]

요약: 3상 사이리스터 브리지 회로는 AC-DC 변환장치, 대형 모터의 가역속도 조정, 에너지 저장 장치 등 전압과 전류 제어의 여러 분야에서 사용되고 있다. 에너지 저장 장치에서는 현재까지 개발된 여러 가지 대용량 에너지 저장 장치를 중 초전도 에너지 저장 장치 (Superconducting Magnet Energy Storage, SMES)는 상대적으로 에너지 저장용량이 크고 응답 속도가 빨라서 오랜 시간동안 잦은 충·방전이 요구되는 시스템에 적용하기에 적합하다. 그리고 전력변환기인 사이리스터 브리지를 대칭 제어하는 대신 비대칭 제어를 하면 상대적으로 평균 출력전압은 감소하지만 유효전력을 최대화하면서 무효전력을 최소화 시켜 역률을 증가시킬 수 있다. 따라서 SMES용 3상 사이리스터 브리지에서 접호되는 α 각을 대칭 또는 비대칭 제어함으로써 특징을 비교 분석하였고 에너지를 SMES에 저장하고 회생 시에는 저장된 에너지를 입력 전원 측에 공급하게 된다. 본 논문에서는 SMES에 에너지를 저장하기 위한 전력변환기인 3상 사이리스터에서 비대칭 제어를 함으로써 무효전력을 최소화 시켜 역률을 증가시킬 수 있는 방법에 대하여 연구하였다.

주제어: 초전도 에너지 저장 장치 (SMES), 3상 사이리스터 브리지, 대칭 제어, 비대칭 제어

Abstract: In a general three-phase thyristor bridge, circuits are used in various fields of voltage and current control such as AC-DC converter, reversible speed adjustment of large motors, and energy storage device. Among the various energy storage devices developed thus far, superconducting energy storage devices have a relatively large energy storage capacity and high response speed, which makes them suitable for systems requiring frequent charge and discharge over a long period. In a superconducting magnet energy storage (SMES) three-phase thyristor bridge circuit, energy is stored in the SMES through symmetrical or asymmetrical control of the alpha angles at which thyristors are turned on, and reverse voltage is generated during the period in which regenerated energy is supplied to the power supply side. This study describes the control characteristics of a power converter for SMES. We studied a method to increase the power factor by minimizing the reactive power through asymmetric control in a three-phase thyristor bridge circuit, which is a power converter for storing energy in SMES.

Keywords: Superconducting magnet energy storage (SMES), Three-phase thyristor bridge, Symmetrical control, Asymmetrical control

1. 서론

최근 화석 연료의 고갈문제와 동시에 신재생에너지의 필요성이 크게 증가되었다[1]. 하지만 신재생에너지는 주변 환경과 조건에 영향을 받아 안정적인 전력공급이 어렵다. 이에 따라 생산되는 에너지의 양이 불확실한 발전기술을 계통에 연계하기 위해서 출력 안정화 기술의 중요성이 증가되었고 에너지 저장 장치를 이용하여 발전량이 계통의

수요보다 크면 남는 전력을 활용하여 에너지를 저장하고 발전량이 수요보다 낮아지면 저장된 에너지를 계통에 보내주는 방식의 에너지 저장 시스템이 필요하다[2][3].

배터리를 이용한 에너지 저장 장치는 충·방전의 횟수의 제약이 있으며, 빈도가 잦을 경우 수명과 관계되는데 초전도 에너지 저장 장치의 경우 충·방전에 의한 성능 저하가 없어서 장기간 사용이 가능하다는 장점을 가지고 있다[4]. 에너

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6739-6458>): Professor, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime & Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan 49112, Korea, E-mail: benkys@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4411

1 M.S, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: seungk0528@naver.com, Tel: 051-410-4892

2 M.S, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: angus3479@naver.com, Tel: 051-410-4892

3 Professor, Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime & Ocean University, E-mail: sglee48@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4821

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

지 저장 장치에서 현재까지 개발된 여러 가지 대용량 에너지 저장 장치들 중 초전도 에너지 저장 장치(Superconducting Magnet Energy Storage, SMES)는 상대적으로 에너지 저장용량이 크고 응답속도가 빠르고 오랜 시간동안 잦은 충·방전이 요구되는 시스템에 적용하기에 적합하다[5]-[8]. 초전도 현상을 이용하면 전기저항이 제로가 되기 때문에 대용량, 대출력, 고효율의 전력기기를 다룰 수 있다[9][10].

사이리스터 브리지 회로는 초전도 에너지 저장 장치에 에너지를 저장하기 위한 전력변환기로 Figure 1과 같이 정측(Positive group)의 3개의 사이리스터와 부측(Negative group)의 3개의 사이리스터로 나누어 구성하여 정측의 제어각을 α_1 , 부측의 제어각을 α_2 로 나타내었을 때, 비대칭 제어는 $\alpha_1 \neq \alpha_2$ 이고 제어각의 범위에 따른 평균 출력전압의 극성에 따라 Mode로 나누었고 Table 1과 같이 나타내었다[11]-[13]. Figure 1의 SCS(Super Conducting Switch)는 영구전류모드에서 사용되는 초전도 스위치를 나타낸다.

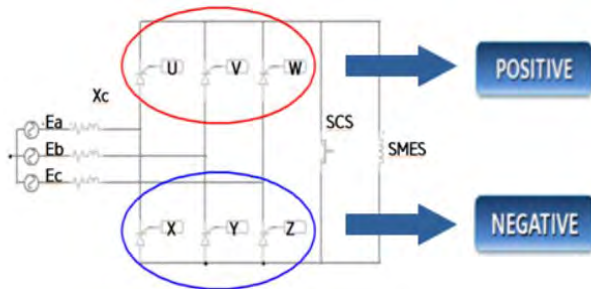


Figure 1: 3-phase thyristor bridge circuit control method

Table 1: Mode according to control angle

	Converter mode	Inverter mode
Control angle range	$\alpha_1 + \alpha_2 < 180^\circ$	$\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ$
Average output voltage	(+)	(-)

사이리스터 브리지에서 무효전력을 최소로 하기 위해서는 측의 제어각을 최대 또는 최소로 제어하고 나머지 측을 출력에 따라 조정하게 되면 무효전력을 최소로 하고 원하는 출력을 얻을 수 있고 출력 전압을 정밀하게 제어하여 얻을 수 있다[14]-[17].

2. 이론

2.1 초전도 에너지 저장 시스템 (SMES system)

초전도 에너지 저장 시스템은 초전도 성질의 인덕터를 만들어 초전도 상태를 만들어줌으로써 저항성분이 0이 되는 환경을 만들어주어 초전도 성질의 인덕터가 에너지를 손실 없이 저장하는 시스템이다 [18]-[20]. Figure 2는 초전도 에너지 저장 시스템의 에너지 저장 방법에 대하여 나타낸 그림이고 Table 2는 시간 영역에서 구간을 나누어 해석한 표이다.

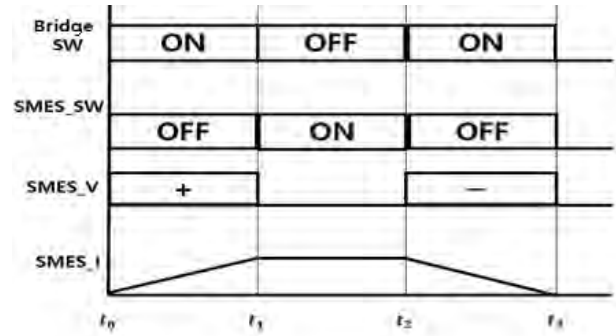


Figure 2: Energy storage control method of superconducting energy storage system

Table 2: Interpretation of superconducting magnet energy storage system

Section	Explanation of a section
$t_0 - t_1$	Store energy on superconducting energy storage devices through a three phase thyristor device
$t_1 - t_2$	Feed wheeling energy from the superconducting energy storage device by turning off the three phase thyristor device and turning on the superconducting switch
$t_2 - t_3$	Restore energy from the superconducting energy storage device by turning off the superconducting switch and turning on the three phase thyristor device

2.2 비대칭 제어 (Asymmetry control)

비대칭 제어에서는 제어각 α_1 과 α_2 를 다르게 제어하는 것이 특징이며 α_1 을 0° 로 고정하고 α_2 를 180° 까지 점차적으로 증가시켜 제어하였을 경우 비대칭 제어에서 컨버터 모드로 동작하게 되어 평균 출력전압은 양의 값을 갖게 되고 제어각에 따라 지연 점호되면서 무효전력을 최소화 시키면서 평균 출력전압을 제어할 수 있다[21]-[25].

인버터 모드에서는 α_2 를 180° 로 고정시키고 α_1 을 0° 에서부터 180° 까지 점차적으로 증가시켜 제어하였을 경우 이고 평균 출력전압은 음의 값을 갖게 되고 컨버터 모드 특성과 같게 지연 점호되면서 무효전력을 최소화시키고 평균 출력전압을 제어할 수 있다[26].

2.3 제어에 따른 출력전압과 출력전류 및 역률

정측과 부측의 점호 제어각 α_1 과 α_2 에서 $\alpha_1 + \alpha_2 < 180^\circ$ 인 경우 (+)로 $\alpha_1 + \alpha_2 > 180^\circ$ 인 경우 (-)로 평균 출력전압의 직류성분(V_d)이 나타나게 되고 출력전압 V_o 를 푸리에 급수로 전개하면 식 (1)과 같다[12].

$$V_o = V_d + \sum \sqrt{A_n^2 + B_n^2} \cos(n\omega t - \theta_n) \quad (1)$$

이때의 평균 출력전압의 직류성분(V_d)는 식 (2)와 같다.

$$V_d = \frac{3}{2\pi} \left[\int_{\alpha_1 + \pi/3}^{\alpha_2 + 2\pi/3} \sqrt{3} V_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) d\omega t + \int_{\alpha_2 + 2\pi/3}^{\alpha_1 + \pi} \sqrt{3} V_m \sin \omega t d\omega t \right] [V]$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) [V] \quad (2)$$

출력전류 I_o 는 식 (3)과 같다.

$$I_o = I_d + \sum \frac{\sqrt{A_n^2 + B_n^2}}{[R^2 + (n\omega L)^2]^{1/2}} \cos(n\omega t - \theta_n - \phi_n)$$

$$(\phi_n = \tan^{-1}(\frac{n\omega L}{R})) \quad (3)$$

이때의 평균 출력전류의 직류성분(I_d)는 평균 출력전압 (V_d)와 유도기전력(V_c)를 고려하였을 때 식 (4)와 같다[27].

$$I_d = \frac{\sqrt{3} V_m}{R} \left[\frac{3}{2\pi} (\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2) - V_c \right] \quad (4)$$

최대출력전압 V_{dm} 은 $\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m$ 이므로 정측 제어각 α_1 과 부측 제어각 α_2 에 따른 Unit output voltage (V_{dpu})와 V_{dm} 의 관계는 식 (5)와 같고

$$V_{dpu} = \frac{V_d}{V_{dm}} = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{2} \quad (5)$$

V_{dpu} 와 전류 I_d 에 따른 유효전력과 무효전력의 관계를 Unit active power와 Unit reactive power를 제어각 α_1 과 α_2 로 나타내었을 경우 식 (6)과 식 (7)과 같다[28]-[30].

$$P = \frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{2} \quad (6)$$

$$Q = \frac{\sin\alpha_2 + \sin\alpha_1}{2} \quad (7)$$

2.4 전류의 겹침과 전류각(u)

사이리스터 브리지의 동작 특성에서 각각의 사이리스터가 턴-오프되며 전류할 때, 입력리액턴스(X_c)와 전류각(u)를 고려하여야 한다. 사이리스터 U가 V로 전류할 때의 그림은 Figure 3과 같고 α 는 점호 제어각을 나타내고 전류각(u)동안 전류하는 기간을 가지게 된다[15][30]. 이때의 각상의 전압을 페루프 방정식으로 표현한 식이 식 (8) 이고 식 (9)은 전류의 방정식을 나타내었다. Figure 4는 사이리스터 U가 V로 전류할 때 전류파형을 나타내었다.

$$e_a - X_c \frac{di_a}{dt} + X_c \frac{di_b}{dt} - e_b = 0 \quad (8)$$

$$i_a + i_b = i_d \quad (9)$$

이때의 i_a 의 전류와 i_b 의 전류를 식 (10)과 (11)로 나타내면

$$i_a = i_d - \frac{\sqrt{3} V_m}{2X_c} [\cos\alpha_1 - \cos(\omega t + \alpha_1)] \quad (10)$$

$$i_b = \frac{\sqrt{3} V_m}{2X_c} [\cos\alpha_1 - \cos(u + \alpha_1)] \quad (11)$$

과 같고 식 (11)로부터 전류각(u)를 구할 수 있고 식 (12)로 나타내었다.

$$u = \cos^{-1} [\cos\alpha - 2X_{cpu} \frac{i_d}{i_{dn}}] - \alpha \quad (12)$$

$$(X_{cpu} = \frac{X_c}{\sqrt{3} V_m} i_{dn})$$

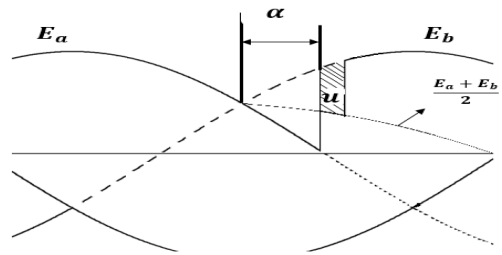


Figure 3: The control angle(α) and the switching angle(u) when the conducting of the thyristor of the 3-phase bridge is transferred from U-Z to U-V

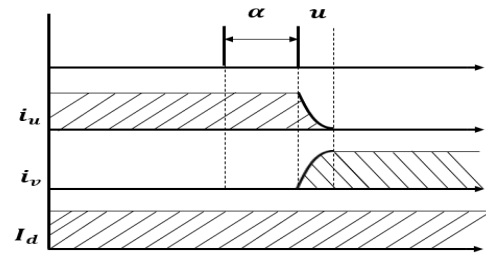


Figure 4: Current i_u , i_v and average output current I_d when the conducting of the thyristor of the 3-phase bridge is transferred from U-Z th U-V

3. 초전도 에너지 저장 장치용 전력변환기

3.1 사이리스터의 전류 실패

사이리스터 U-V가 전류 중에 Z-X가 동시 전류가 가능한 구간은 a상과 b상의 평균 전위보다 c상의 전위가 높을 때 이고, U-V가 전류된 후 Z-X의 전류가 이루어지면 a상과 c상의 평균 전위보다 b상의 전위가 높기 때문에 소자된 U가 다시 도통하고 Z-X의 전류가 완료된 후 U-V의 전류가 다

시 이루어진다.

Figure 5는 사이리스터 U-V가 전류 중에 Z-X의 전류가 일어나는 경우 U-V의 전류가 잠시 중단되고 Z-X의 전류가 이루어지는 그림이다.

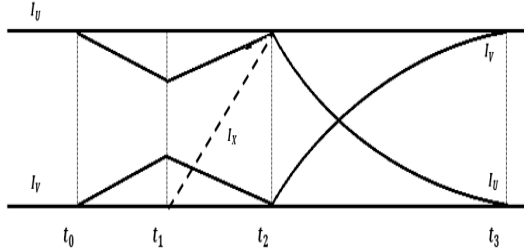


Figure 5: Current waveform when switching Z-X during switching of thyristor U-V

\$t_0 - t_1\$구간에서 U-V의 전류가 이루어지던 중 \$t_1 - t_2\$구간에서 Z-X의 전류가 시작되고 U-V의 전류는 중단된다. 사이리스터 U와 X가 도통되면서 순환과정을 거치고 \$t_2 - t_3\$구간에서 Z-X의 구간은 마무리되고 중단되었던 U-V의 전류가 이루어지게 된다. 하지만 \$t_2 - t_3\$구간에서 U-V의 전류가 이루어지지 못하면 전류는 실패하게 되고 전류각(\$u\$)를 고려하여 전류가 실패되지 않도록 하여야 한다.

3.2 사이리스터의 동시 전류와 성공 영역

제어각 \$\alpha_1\$과 \$\alpha_2\$에 따라 전류 상호영향이 일어나는 구간을 나타낸 식 (13)이고 Figure 6으로 나타내었다.

$$\alpha_2 \geq \frac{\pi}{2}, \tag{13}$$

$$(\alpha_1 + u_1 - \frac{\pi}{3} \leq \alpha_2 \leq \alpha_1 + u_1 - \frac{\pi}{3} + \omega t_{off})$$

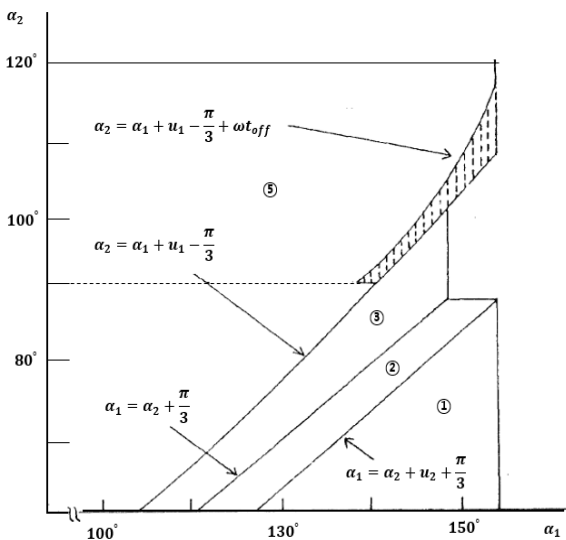


Figure 6: Transition mutual influence section in asymmetric control method

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.1 회로 구성

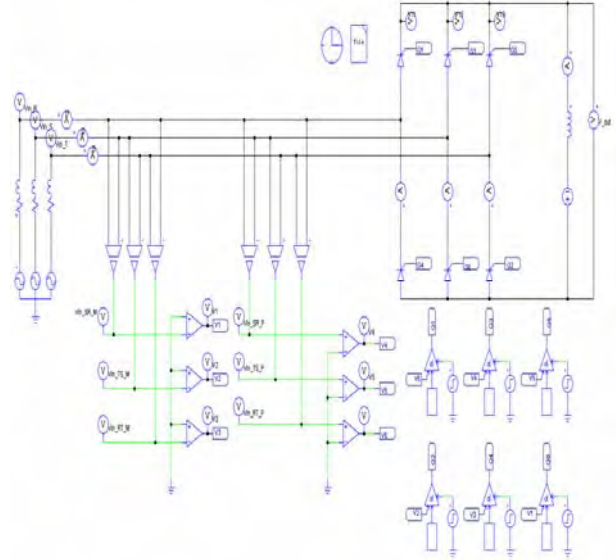


Figure 7: 3-phase thyristor bridge circuit configuration

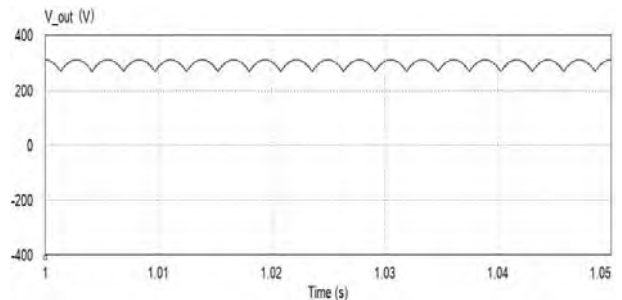
Table 3: Input voltage and current and capacity of SMES

V_{in}	220	[V]
I_{in}	300	[A]
L	2	[H]
SMES	2	[MJ]

Psim 프로그램을 사용하여 Figure 7과 같이 회로를 제작하였고 SMES에 해당하는 \$X_L\$은 저장성분이 없는 아주 큰 인덕터로 가정하여 회로에 부하로 설정하였고 Psim simulation View로 결과를 확인하였다.

4.1.1 컨버터 모드 (Converter mode)

Figure 8은 컨버터 모드에서 제어각 \$\alpha_1\$을 \$0^\circ\$, \$\alpha_2\$을 \$0^\circ\$로 대칭 제어하였을 경우 전압 파형이다.

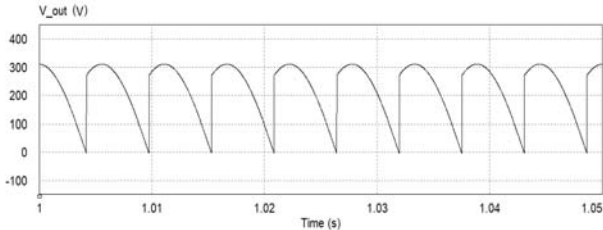


(a) \$\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 0^\circ\$ (1 ~ 1.05)

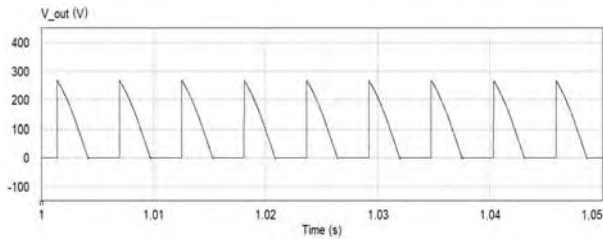
Figure 8: Output voltage waveform of symmetrical control of converter mode angle \$\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 0^\circ\$

Figure 9은 컨버터 모드에서 제어각 α_1 을 $60^\circ, 120^\circ$, α_2 을 0° 로 비대칭 제어하였을 경우 전압 파형이다.

Figure 10는 컨버터 모드에서 제어각 α_1 을 120° 로 제어하고 α_2 를 0° 로 제어하였을 경우 출력전압과 전류의 고조파를 분석한 그림이다.

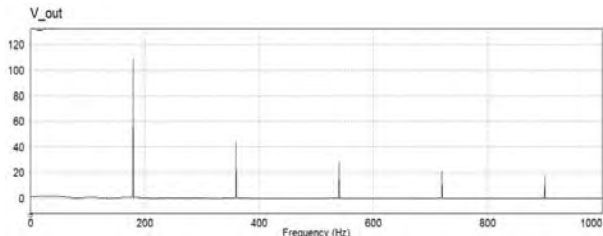


(a) $\alpha_1 = 60^\circ, \alpha_2 = 0^\circ$ (1 ~ 1.05)

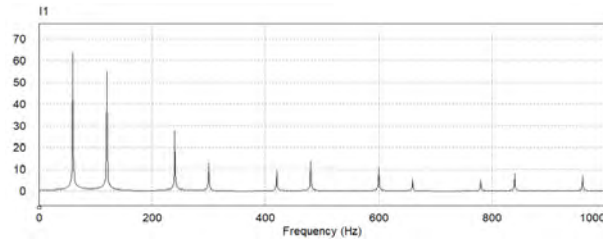


(b) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 0^\circ$ (1 ~ 1.05)

Figure 9: Output voltage waveform of asymmetrical control of converter mode angle $\alpha_1 = 60^\circ, 120^\circ$, $\alpha_2 = 0^\circ$



(a) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 0^\circ$ (0 ~ 1000 Hz)



(b) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 0^\circ$ (0 ~ 1000 Hz)

Figure 10: Harmonic analysis of output voltage and current with control of converter mode

4.1.2 인버터 모드 (Inverter mode)

Figure 11은 인버터 모드에서 제어각 α_1 을 150° , α_2 을 150° 로 대칭 제어하였을 경우 전압 파형이다.

Figure 12은 인버터 모드에서 제어각 α_1 을 120° , α_2 을 $180^\circ, 150^\circ$ 로 비대칭 제어하였을 경우 전압 파형이다.

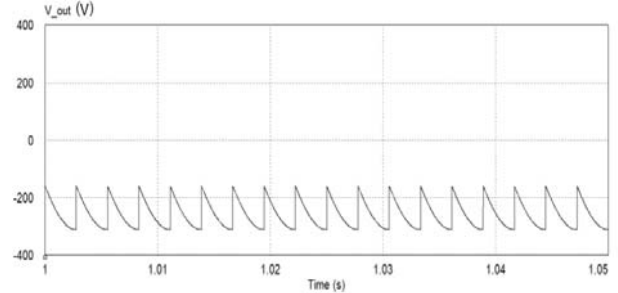
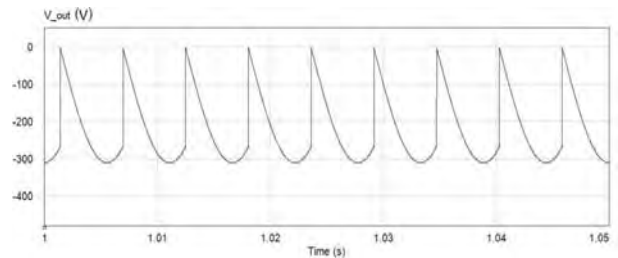
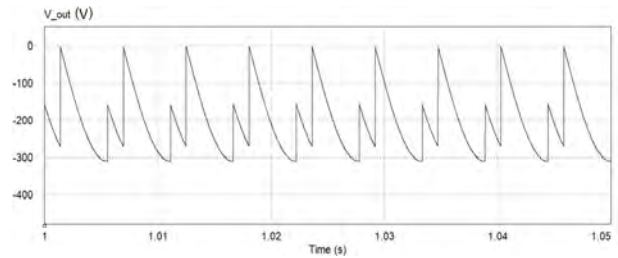


Figure 11: Output voltage waveform of symmetrical control of inverter mode angle $\alpha_1 = 150^\circ, \alpha_2 = 150^\circ$

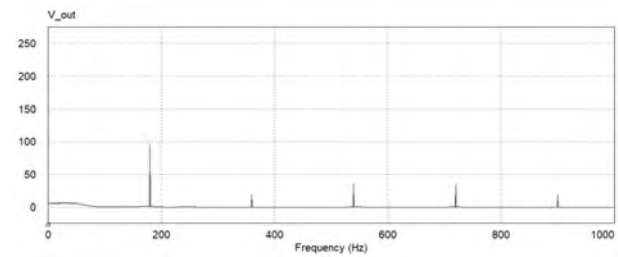


(a) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 180^\circ$ (1 ~ 1.05)

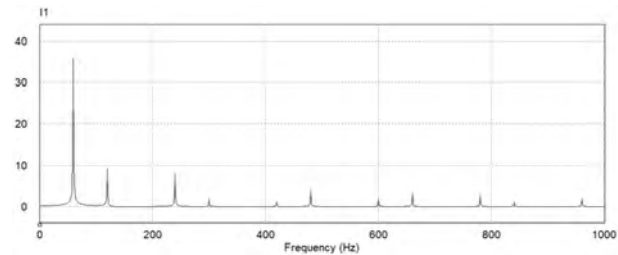


(b) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 150^\circ$ (1 ~ 1.05)

Figure 12: Output voltage waveform of asymmetrical control of inverter mode angle $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 180^\circ, 150^\circ$



(a) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 150^\circ$ (0 ~ 1000 Hz)



(b) $\alpha_1 = 120^\circ, \alpha_2 = 150^\circ$ (0 ~ 1000 Hz)

Figure 13: Harmonic analysis of output voltage and current with control of inverter mode

Figure 13는 인버터 모드에서 제어각 α_1 을 120° 로 제어하고 α_2 를 150° 로 제어하였을 경우 출력전압과 전류의 고조파를 분석한 그림이다.

대칭 제어를 할 경우 출력 전압은 입력 전압 주파수의 6배의 고조파를 기본으로 하는 고조파를 함유하고 있고 비대칭 제어를 하였을 경우 한 주기가 120° 의 간격으로 연속되어 출력 전압의 기본 주파수는 입력 주파수의 3배가 된다. 비대칭 제어에서 컨버터 모드일 때와 인버터 모드일 때 전류의 고조파 분석 결과 3의 배수는 나타나지 않음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 3상 사이리스터 브리지 회로에서 비대칭 제어를 이용하여 무효전력을 최소화하고 역률을 증가시켜 평균 출력전압을 제어하는 전력변환기를 제안하였다.

제안하는 시스템은 사이리스터 브리지에서 컨버터 모드로 비대칭 제어를 하였을 경우, 평균 출력전압은 감소하지만 무효전력을 감소시켜 역률을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 마찬가지로 인버터 모드에서도 비대칭 제어를 하였을 경우, 평균 출력전압은 감소하지만 무효전력을 감소시켜 역률을 증가시킬 수 있다. 초전도 전력저장장치의 비대칭 전력 제어 시 무효전력감소에 따른 전력변환효율을 향상시킬 수 있지만 정류과 부측의 상이한 제어각에 따른 사이리스터 전류실패의 위험이 존재함을 확인하고 전류실패가 일어나는 제어각 영역을 명확히 규명하였다. 또한 PSIM 시뮬레이션을 수행하여 초전도 에너지 저장장치의 컨버터 모드 및 인버터 모드 운전시의 동작특성을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로 초전도 에너지 저장장치의 전력변환기 제어에 전류실패영역을 고려한 비대칭제어를 적용하여 무효전력을 감소한 전력제어가 가능할 것으로 판단된다.

Author Contributions

Conceptualization, S. H. Kim and Y. S. Kim; Methodology, S. H. Kim; Verification, Data collection, Drafting, Software, Writing and editing, M. H. Kim; Software, Reviews and editing, S. G. Lee; Verification and Management, S. G. Lee.

References

[1] I. S. Hong, LG Business Insight 2010 7.7, Weekly focus, pp. 34-42, 2010.
 [2] A. R. Kim, H. R. Seo, G. H. Kim, M. Park, I. K. Yu, Y. Otsuki, J. Tamura, S. H. Kim, K. Sim, and K. C. Seong, "Operating Characteristic analysis of HTS SMES for frequency stabilization of dispersed power generation system," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 20, no. 3, pp. 1334-1338, 2010.

[3] H. Y. Jung, A. R. Kim, J. H. Kim, M. Park, I. K. Yu, S. H. Kim, K. Sim, H. J. Kim, K. C. Seong, T. Asao, and J. Tamura, "Study on the operating characteristics of smes for the dispersed power generation system," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 3, pp. 2028-2031, 2009.
 [4] J. H. Kim, S. Y. Hahn, C. H. Im, J. K. Jung, and S. Y. Hahn, "Design of a 200-kJ HTS SMES system," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 12, no. 1, pp. 774-777, 2002.
 [5] H. K. Yeom, D. Y. Ko, S. J. Park, U. J. Hong, and H. B. Kim, "State of the art report," Superconductivity and Cryogenics, vol. 20, no. 3, pp. 48-60, 2008.
 [6] S. Lee, "Magnetic field calculation of toroidal winding with circular section," Superconductivity and Cryogenics, vol. 12, no. 1, pp. 28-31, 2010.
 [7] S. Lee, Y. Kim, S. H. Park, J. K. Lee, J. H. Bae, K. C. Seong, K. Choi, and S. Hahn, "Design of an high temperature superconducting magnet for a 5 MJ SMES," pp. 894-895, July 20, 2011.
 [8] S. Lee, K. P. Yi, S. H. Park, J. K. Lee, W. S. Kim, C. Park, J. H. Bae, K. C. Seong, I. Park, K. Choi, and S. Hahn, "Design of HTS toroidal magnets for a 5 MJ SMES," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22, no. 3, pp. 5700904, 2012.
 [9] N. segeo, "Development of superconducting instantaneous compensation SMES," Monthly of Electrical Technology & Information (in Korea), 2004.
 [10] K. Kim, S. Lee, S. Kim, M. Park, I. K. Yu, J. K. Lee, S. Y. Lee, K. Choi, K. C. Seong, and H. Yeon, "Stress analysis for Toroid-Type HTS SMES coil and bobbin structure considering large parallel magnetic field," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, pp. 2275-2278, 2011.
 [11] V. R. Stefanovic, "power factor Improvement with a modified phase controlled Converter," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-15, no. 2, 1979.
 [12] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 2001.
 [13] S. B. Dewan and A. S. Straughen, Power Semiconductor Circuit, John Wily & Sons, Inc, 2009.
 [14] P. C. Sen and Murray L. MacDonald, "Thyristorized D.C drives with regenerative braking and speed reversal," IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-25, no. 4, 1978.
 [15] P. Mehta and S. K. Mukhopadhyay, "Improvement in

- DC motor performance by asymmetrical triggering,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-11, no. 2, Mar/Apr, 1975.
- [16] B. R Pelly, Thyristor Phase-Controlled Converter and Cycloconverters. John Wiley & Sons, Inc, 1971.
- [17] G. Oliver, V. R. Stefanovic, and G. E. April, “Microprocessor controller for a thyristor converter with an improved power factor,” IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation, vol. IECI-28, no. 3, Aug, 1981.
- [18] G. Oliver and V. R. Stefanovic, “Thyristor current source with an improved power factor,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-29, no. 4, Nov, 1982.
- [19] M. J. Kocher and R. L. Steigerwald, “An AC-to-DC converter with high quality input waveforms,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-19, no. 4, July/Aug, 1983.
- [20] A. Mirbod and A. EI-Amawya, “A general-purpose microprocessor-based control circuit for a three-phase controlled rectifier bridge,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-33, no. 3, Aug, 1986.
- [21] A. Alexandrovitz, A. Yair, and E. Epstein, “Analysis of a static VAR compensator with optimal energy storage element,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. Ie-31, no. 1, Feb, 1984.
- [22] M. H. Rashid and A. I. Maswood, “Analysis of three-phase AC-DC converters under unbalanced supply conditions,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. 3 May/June, 1988.
- [23] E. Muljadi, R. Schiferl, and T. A. Lipo, “Induction machine phase balancing by unsymmetrical thyristor voltage control,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-21, no. 3 May/June, 1985.
- [24] M. H. Rashid and A. I. Maswood, “A novel method of harmonic assessment generated by three-phase AC-DC converter under unbalanced supply condition,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. 4 July/Aug, 1988.
- [25] R. L. Kustom, James J. Skiles, J. Wang, J. Cleary, and F. Tsang, “Power conversion system for diurnal load leveling with superconductive magnetic energy storage,” IEEE Transactions On Magnetics, vol. Mag-23, no. 5, Sep, 1987.
- [26] W. McMurracy, “A study of asymmetrical gating for phase controlled converter,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-8, no. 3, May/June, 1972.
- [27] N. Sato and Y. Hayashi, "An experimental study of quench protection for superconducting magnetic energy storage," IEEJ Transactions on Power and Energy, Japan, Jan, 1985.
- [28] M. A Slonim and J. D. Van wyk, “Power components in a system with sinusoidal and nonsinusoidal voltages and/or currents,” IEE Proceeding. Pt.B, vol. 135, no. 2 Mar, 1988.
- [29] S. A Hamed and B. J. Chalmers, Phd, Dsc, CEng, Fiee, “New method of analysis and performance prediction for thyristor voltage-controlled RL load,” IEE Proceedings, Pt B, vol. 134. no. 6, Nov, 1987.
- [30] G. Moltgen, Converter Engineering, Siemens Akkiengesellschaft John Wiley And Sons, 1984.