論文 6-1-3

2000 전력전자학술대회 우수추천논문

단상 인버터의 동작에 의한 이중접속 3상 전압원 인버터의 출력파형 개선

崔 世 琓, 梁 承 旭

Output Waveform Improvement of Double-Connected 3-Phase Voltage Source Inverter by Single-Phase Inverter

Sewan Choi, Seunguk Yang

요 약

본 논문에서는 전압원 인버터의 출력전압 파형을 개선하기 위한 새로운 이중접속 3상 전압원 인버터를 제안한다 보조회로의 단상인버터로 리플전압을 발생시키고 이를 기존의 12-스텝 인버터에 주입함으로서 12-스텝 동작이 36-스텝 동작으로 전환된다. 한편, 출력 측의 결합용 위상 변압기로서 커플링 리액터를 도입하여 변압기의 KVA용량을 감소시킨다 또한 본 방식을 포함한 전체의 정류기-인버터 시스템을 제안하고, 실험에 의해 본 방식의 타당성을 입증한다

ABSTRACT

This paper proposes a new double-connected 3-phase voltage source inverter with improved output voltage waveform. An auxiliary single-phase inverter injects a ripple voltage into the double-connected inverter to convert 12-step operation to 36-step operation The KVA rating of the output phase-shifting transformer is reduced by employing a harmonic canceling reactor The whole rectifier-inverter system including the proposed technique is introduced, and the experimental results are provided

Key Words Multi-Step, Double-Connected, Voltage Source Inverter, Coupling Reactor

1. 서 론

3상 진압원 인버터는 교류 전동기의 가변속 구동장치, 무정전 전원장치(UPS)및 정지형 무효전력 보상장치(SVC)등에 폭넓게 사용되고 있다[1-4] 인버터의 출력파형을 개선하기 위하여 고주파 동작이 가능한 IGBT 등을 사용하는 PWM방식은 주로 중・소용량의 교류전동기 구동이나 UPS등에 사용되고 있지만 동작주파수가 수백Hz 정도인 GTO를 사용하는 중・대전력의 응용에서는 이러한 PWM방식을 사용할 수 없다 따라서 이러한 중・대전력용 인버터에는 복수대의 인버터를 직렬 또는 병렬로 접속하여 용량을 늘리고 위상변압기로 출력을 결합하여 파형을 개선하는 다중화방식이 사용되고 있다 이 다중화방식은 저차고조파를 제거 하여도 고차고조파가 증대되지 않을 뿐 아니라, 복수대의 인버터를 사용하기 때문에 이중 일부가 고장시에도 분리하면 계속 운전이 가능하므로 신뢰성이 높다[1] 그러나 이 방식은 출력파형의 개선을 위하여 스텝수를 증가시키려면 인버터 브리지와 위상변압기의 수를 늘려야 한다 예를 들면, 36-스텝 인버터를 구현하기 위하여는 6대의 인버터(즉 36개의 스위칭 소자)와 6대의 위상변압기를 사용하여야 하는데 단지 출력파형을 개선하기 위하여 인버터를 다중화하는 것은 비용이나 설치면적 등에서 비경제적이다

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)

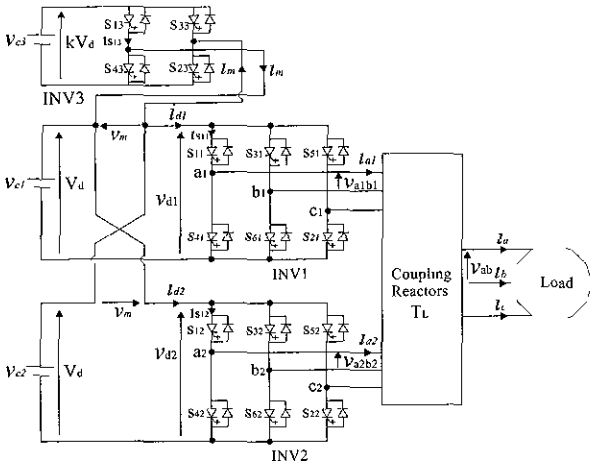


그림 1 제안한 36-스텝 인버터
Fig 1 Proposed 36-step Inverter

따라서 이를 개선한 전원분할방식의 이중접속 전압원 인버터가 제안되었다.[1-4] 문헌 [2]에서는 전압형 상간 리액터를 사용하여 36-스텝 인버터를 구현하였고, 문헌 [3]에서는 출력측에 커플링 리액터를 사용하여 60-스텝 파형으로 6상 유도전동기에 적용하였다 또한 문헌 [4]에서는 보조회로에 단권변압기를 사용하여 24-스텝과 36-스텝의 파형을 얻을 수 있었다 문헌 [2]와 [4]의 방식은 보조회로에 리플전압 주입용으로 사용되는 리액터 소자가 포화되면 오동작을 일으킬 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 보조회로에 리액터 소자를 사용하지 않는 새로운 이중접속형 전압원 인버터를 제안하고자 한다 제안한 인버터는 기존의 이중접속형 12-스텝 인버터에 단상 인버터만을 보조회로로 하여 36-스텝의 출력파형을 얻는다 또한 출력측에 결합 변압기로서 커플링 리액터를 채택하여 변압기의 VA용량을 감소시킨다.[5] 본 논문에서는 제안한 인버터의 동작원리, 전압・전류해석에 의한 최적 파라메터의 선정 및 각 소자의 용량을 계산하고 본 방식을 포함한 전체의 정류기-인버터 시스템을 제안한다 또한 실험에 의해 본 방식의 타당성을 입증한다

2. 동작원리

그림 1은 제안하는 인버터 시스템을 나타낸다 두 대의 3상 인버터 브리지(INV1,INV2)는 출력측의 커플링 리액터 T_L에 의하여 결합되고, 보조회로로서 사용된 단상 인버터 INV3의 출력을 각 3상 인버터의 입력에 그림과 같이 연결한다 두 대의 3상 인버터 INV1

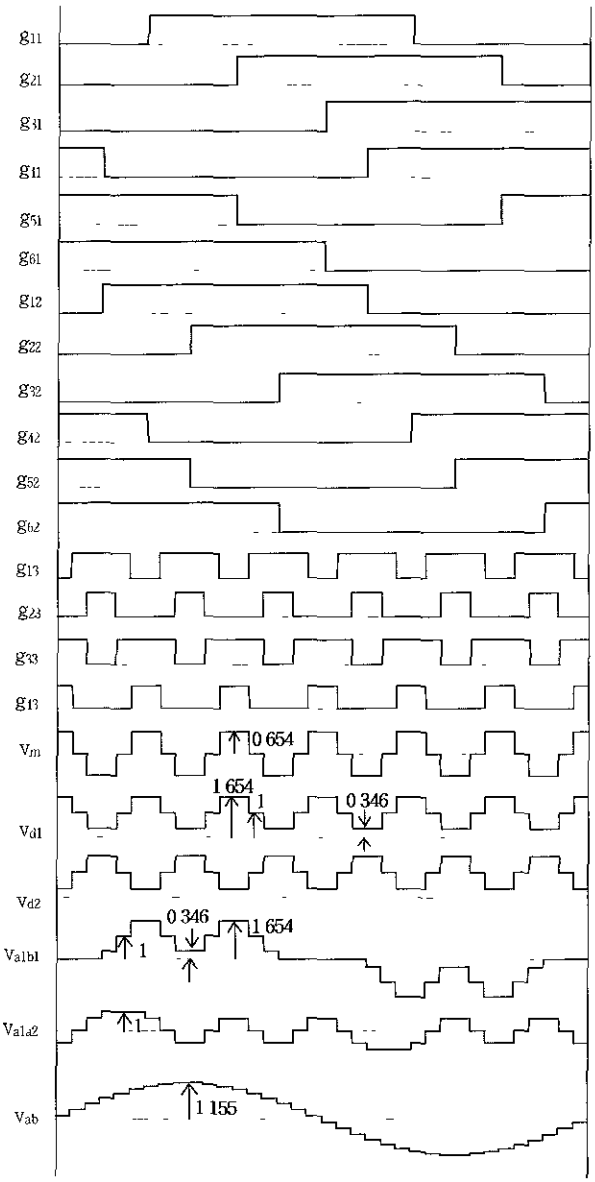


그림 2 제안한 36-스텝 인버터의 주요 파형
(V_d=1 , k=0 654 일 때)
Fig 2 Waveforms for the Proposed 36-step Inverter
(when V_d=1 , k=0 654)

과 INV2는 180° 도통방식으로 구동되며 서로 30° 의 위상차를 갖도록 한다 단상인버터 INV3은 3상 인버의 6배 주파수로 동작한다 각 인버터의 스위치 S_{ij}의 게이트 신호 g_{ij}(이때 i(i=1~6) 는 스위치 번호, j (j=1,2)는 인버터 번호를 표시함) 및 이에 따른 각부의 파형을 그림 2에 나타낸다. 먼저 출력전압의 해석을 용이하게 하기 위하여 사용한 스위칭 소자와 커

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.
서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)

플링 리액터는 이상적이라고 가정한다 각 인버터의 입력전압은

$$v_{c1} = v_{c2} = V_d \tag{1}$$

$$v_{c3} = kV_d \tag{2}$$

이며, 이때 k는 주 인버터의 입력전압에 대한 보조회로의 입력전압비 이다 단상 인버터의 출력전압 v_m은 입력전압과 게이트 신호에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$v_m = (g_{13} - g_{33})v_{c3} \tag{3}$$

각 3상 인버터의 입력전압은

$$v_{d1} = v_{c1} - v_m \tag{4}$$

$$v_{d2} = v_{c2} + v_m \tag{5}$$

이고, 각 3상 인버터의 출력전압은 다음과 같다

$$v_{ajbj} = (g_{1j} - g_{3j})v_{dj} \tag{6}$$

$$v_{bjcj} = (g_{3j} - g_{5j})v_{dj} \tag{7}$$

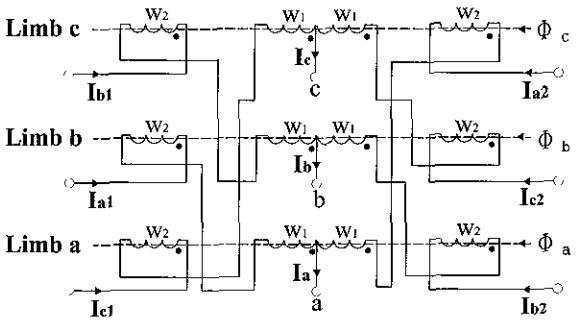
$$v_{cjaj} = (g_{5j} - g_{1j})v_{dj} \tag{8}$$

한편, 그림 1의 고조파 제거를 위한 3상 커플링 리액터의 결선도와 기본파에 대한 전류의 페이서도를 그림 3에 나타낸다[5] 그림 3(a)의 각 3상 철심에 연결된 권선 W_1과 W_2의 권수비 $a = W_2/W_1$는 그림 3(b)의 페이서도에서 보듯이 두 6-스텝 인버터의 전류가 서로 30° 의 위상차를 갖도록 결정한다. 즉, a상의 부하전류 I_a에 대하여 각 인버터의 출력전류 I_{a1}과 I_{a2}가 각각 +15° 와 −15° 의 위상을 갖도록 하여 기본파 전류에 대한 기자력의 합이 0이 되도록 하면 권수비 $a = 0.366$ 이 된다 또한 이러한 결선에 의한 커플링 리액터의 선간 출력 전압을 3상 인버터의 출력전압으로 표현하면 다음과 같다[6]

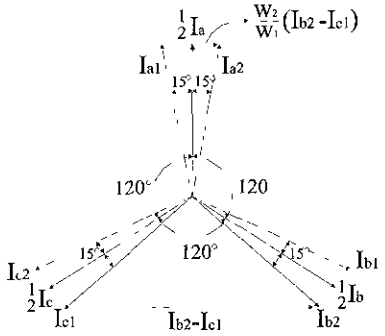
$$v_{ab} = \frac{(v_{a1b1} + v_{a2b2})}{2} + 0.077(v_{a1a2} + v_{b1b2} - 2v_{c1c2}) \tag{9}$$

따라서 식 (1)에서 (9)로부터, 출력전압 v_{ab}는 각 인버터의 게이트 신호와 인버터 INV3의 입력 전압비 k에 의하여 다음과 같이 된다

$$\begin{aligned} v_{ab} = \frac{V_d}{2}[&1.155(g_{11} - g_{32}) - 0.845(g_{31} - g_{12}) \\ &- 0.31(g_{51} - g_{52}) + k(g_{33} - g_{13})\{1.155(g_{11} + g_{32}) \\ &- 0.845(g_{31} + g_{12}) - 0.31(g_{51} + g_{52})\}] \end{aligned} \tag{10}$$



(a) 결선도
(a) Winding Configuration



(b) 기본파 전류에 대한 페이서도
(b) Phasor Diagram for fundammental current

그림 3 커플링 리액터
Fig 3 Coupling Reactor

인버터 출력전압의 왜곡율 (Distortion Factor)은

$$DF = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{ab\,n}^2}}{V_{ab\,1}} \times 100 \tag{11}$$

로 정의되며, 전압비 k에 따른 출력전압의 왜곡률을 그림 4에 나타낸다 그림 4로부터 전압비 $k = 0.654$ 일 때 왜곡률은 $DF = 3.99\%$로 최소로 되며 이때 출력전압의 파형은 그림 2에서 보듯이 기존의 36-스텝 인버터와 동일하다. 그리고, 각 3상 인버터 입력전류는 각 인버터의 출력전류와 게이트신호에 의해 다음과 같이 된다

$$i_{dj} = g_{1j}i_{aj} + g_{3j}i_{bj} + g_{5j}i_{cj} \tag{12}$$

또한, 단상인버터의 출력전류 i_m은

$$i_m = i_{d2} - i_{d1} \tag{13}$$

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.
서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)

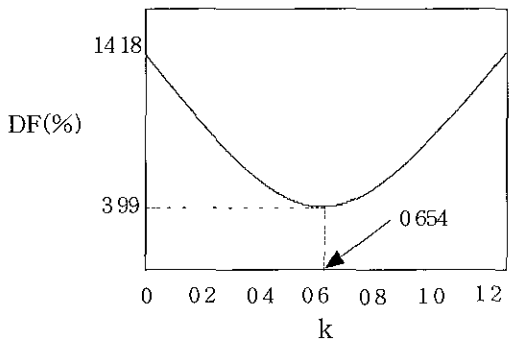


그림 4 보조회로의 전압비 k에 따른 출력전압의 왜곡률
Fig 4 Distortion Factor of Output Voltage with Respect to Voltage Ratio k of Auxiliary Circuit

이므로, 3상 인버터의 스위치 전류 i_{s11}과 단상 인버터의 스위치 전류 i_{s13}은 다음과 같이 된다

$$i_{s11} = g_{11}\ i_{a1} \tag{14}$$

$$i_{s13} = g_{13}\ i_m \tag{15}$$

3. 커플링 리액터의 용량과 소자의 정격

본 절에서는 커플링 리액터의 용량과 스위칭 소자의 용량을 계산한다 리액터 권선의 전압정격을 계산할 때 정현파의 경우는 실효값(Effective voltage)을 사용하나, 비정현파인 경우는 인가전압에 의해 유기된 최대자속값을 고려하여 다음과 같이 정의된 등가실효전압(Equivalent effective voltage)을 사용한다

$$V_{eq} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \int_0^{\pi} v_w d\theta \tag{16}$$

여기서 v_w는 권선에 인가된 비정현파형의 전압임 한편, a상 철심의 자속의 변화율은

$$\frac{d\Phi_a}{dt} = \frac{1}{w_2 + 2w_1} v_{a1a2} \tag{17}$$

이 되므로 권선 W_1과 W_2의 등가 실효전압은 각각

$$V_{W1\ eq} = 0.224\, V_d \tag{18}$$

$$V_{W2\ eq} = 0.082\, V_d \tag{19}$$

이 된다 또한 부하전류의 실효값을 I_a라 할때 권선 W_1과 W_2에 흐르는 전류의 실효값 I_{a1}은 그림 3(b)의 페이서도로부터

$$I_{a1} = 0.5176 I_a \tag{20}$$

이 된다 이때, 출력 전력 P_o는 다음과 같다

$$P_o = \sqrt{3}\ V_{ab} I_a = 1.428\, V_d I_o \tag{21}$$

표 1에서 보듯이 KVA용량이 기존의 $\triangle - Y$형 변압기에 비해 약 61%가 감소되었음을 알 수 있다.

한편, 그림 2로부터 각 스위칭 소자의 전압정격을 구할 수 있으며, 부하전류를 정현파로 가정하고 부하전압에 대한 위상의 변화에 따라 스위칭 소자의 전류의 최대값을 구하여 표 2에 나타내었다

표 1 커플링 리액터의 VA 용량
Table 1 VA Rating of Coupling Reactor

	커플링 리액터		기존의 $\triangle - Y$ 형 변압기	
등가 실효 전압	$V_{W1\ eq}/V_d$	0 224	$V_{\triangle\ eq}/V_d$	0 740
	$V_{W2\ eq}/V_d$	0 082	$V_{Y\ eq}/V_d$	0 428
전류의 실효값	I_{W1}/I_a	0 528	$I_{\triangle}/I_a$	0 591
	I_{W2}/I_a	0 528	I_Y/I_a	1
등가 용량	$\frac{0\ 5\sum V_{eq} I_{rms}}{P_o} = 36\ 94\%$		$\frac{0.5\sum V_{eq} I_{rms}}{P_o} = 94\ 54\%$	

표 2 스위칭 소자의 정격
Table 2 Ratings of Switching Devices

		제안한 인버터	기존의 12-스텝 인버터
주 인버터 스위치	V_{pk}/V_d	1 654	1
	I_{pk}/I_a	0 732	1 414
보조회로 인버터 스위치	V_{pk}/V_d	0 654	-
	I_{pk}/I_a	1.035	-

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.
서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)

4. 정류기 - 인버터 시스템

본 논문에서 제안하는 인버터 방식을 사용한 전체 정류기 및 인버터 시스템의 예를 그림 5에 나타낸다.

정류기 REC1과 REC2는 전류용량을 만족하는 경우 1대로 할 수 있다 또한 3상 변압기 T_Y 와 정류기 REC3는 인버터 INV3에 리플전압을 제공하며, 이때 변압기 T_Y와 정류기 REC3에는 매우 작은 전류가 흐르므로 변압기의 VA용량은 매우 낮다.

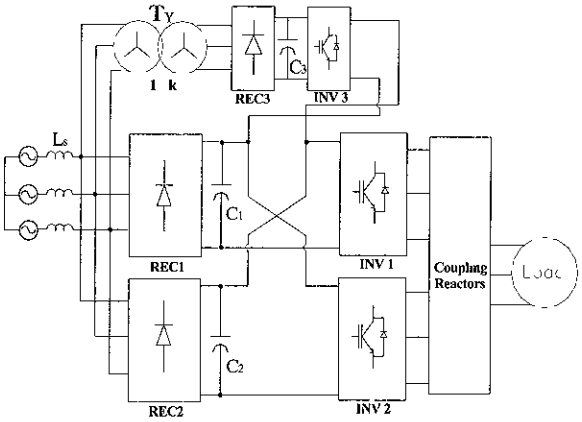
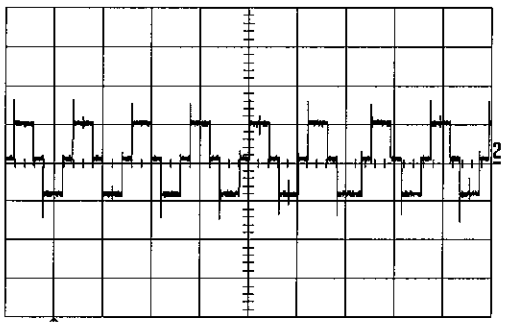


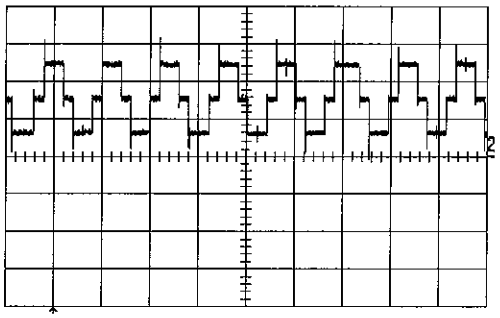
그림 5 제안하는 정류기-인버터 시스템
Fig 5 Proposed Rectifier-Inverter System

5. 실험 결과

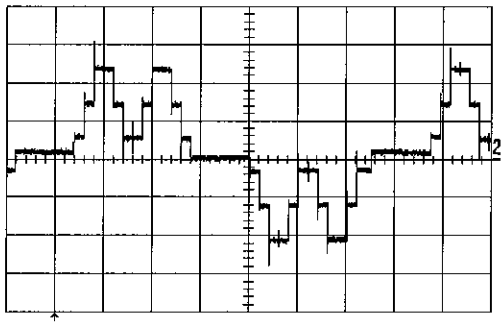
제안한 36-스텝 인버터를 실험하기 위하여 그림 5의 정류기-인버터 시스템을 3KVA급으로 제작하였다. 3상 다이오드의 정류기 입력단의 인덕턴스 L_s는 각각 5mH이고 단상정류기 앞단의 변압기는 권선비 k=0.65



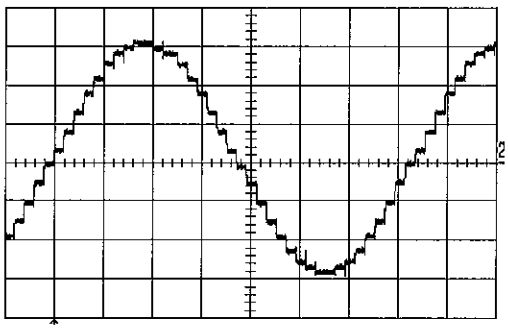
(a) v_m



(b) v_{d1}



(c) v_{a1b1}



(d) v_{ab}

그림 6 제안하는 36-스텝 인버터의 실험 결과
(종축 50V/Div , 횡축 2ms/Div)
Fig 6 Experimental Results for the Proposed 36-Step Inverter
(Vertical 50V/Div , Horizontal 2ms/Div)

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.
서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)

이며, 직류평활용 커패시터 C_1과 C_2, C_3는 3300uF /450V를 사용하였고, 입력전압 V_d=120V, 출력전류 $I_{a,rms}$=3A인 시스템으로 구현하여 실험한 결과를 그림 6에 나타낸다. 그림 6(a)는 단상인버터의 스위치 S_{13} ~ S_{43}의 동작에 의해 유기된 전압을 나타내고, 이 전압에 의해 변화된 인버터 입력전압 v_{dl}는 그림 6(b)와 같다. 그림 6(c)에 인버터의 출력전압 v_{alb1}을 나타내며 부하측 출력전압의 파형은 그림 6(d)로 기존의 36-스텝 파형과 동일하다. 실험결과는 2절의 분석 및 계산결과와 일치함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 전압형 인버터의 출력전압 파형을 개선하기 위한 새로운 이중접속 3상 전압원 인버터를 제안하였다. 제안한 시스템은 16개의 스위칭 소자를 사용하여 36-스텝 인버터를 구현하였고 출력측에 기존의 $\triangle - Y$형 위상변압기를 사용하지 않고 커플링 리액터를 사용함으로써 등가용량이 61%가 감소했다. 또한 기존의 방식에 비하여 보조회로에 리액터소자를 사용하지 않음으로 리액터소자에 의한 오동작이 없으며, 직류전원 분할이 필요없다. 제안한 인버터는 PWM방식을 사용할 수 없는 중・대용량의 인버터에 적용 가능하다.

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단(KRP-99-003-E00161)의 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] K. Oguchi, H. Hama, T. Kubota, "Multilevel Current-Source and Voltage-Source Converter Systems Coupled with Harmonic Canceling Reactors," IEEE IAS Conf. Rec. pp. 1300-1308, 1997.

[2] Masukawa, S. Iida, "A Method for Reducing Harmonics in Output Voltage of a Double-Connected Inverter," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 9. no. 5, pp. 543-550, Sep. 1994.

[3] K. Oguchi, A. Kawaguchi, T. Kubota, N. Hoshi, A Novel Six Phase Inverter System With 60-Step Output Voltages for High-Power Motor Drives," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 35, no. 5, pp. 1141-1149, September/October, 1999.

[4] 양승욱, 최세완, 문건우, 조정구. "SVC적용을 위한 새로운 이중접속방식의 멀티스텝 인버터", 전력전자학회 논문지, 제4권, 제6호, pp. 547-553, 1999.

[5] Depenbrock, M,and Niermann C: Netzfreundliche Gleichrichterschaltung mit netzseitiger Saugdrossel(NSD)-Til : Theorie der Wechselspannungsverh-altnisse, ETZ Arciv 11. 1989, pp. 241-247.

[6] K. Oguchi, N.Nakajima, and T.Sano,"Three-phase three-level voltage-source converters coupled with harmonic canceling interphase reactors," Proceedings of EPE'97 in Trondheim, pp. 4.162-4.167, September 1997.

저 자 소 개

최세완(崔世琓)

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(박사). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1996년~1997 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 당 학회 편집위원.

양승욱(梁承旭)

1972년 10월 1일생. 1999년 호서대 전기공학과 졸업. 2001년 서울산업대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 (주)썬코리아 근무.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

서울과학기술대학교 | IP: 117.17.198.*** | Accessed 2019/04/17 18:16(KST)