

계통연계형 대체에너지 발전시스템을 위한 고펄스 SCR 인버터

정재혁* · 김현정* · 최세완* · 김영석** · 원충연***

*서울산업대학교, **인하대학교, ***성균관대학교

High Pulse SCR Inverter for Utility Interactive Renewable Power Generation System

Jaehyuck Jung* · Hyunjung Kim* · Sewan Choi* · Youngseok Kim** · Chungyuen Won***

*Seoul National Univ. of Technology, **Inha University, ***Sung Kyun Kwan University

ABSTRACT

In this paper, a new line-commutated SCR inverter for renewable power generation system is proposed. The proposed inverter system includes a 6-pulse SCR inverter and an auxiliary circuit. By the proper operation of the auxiliary circuit, the pulse number of the inverter system is increased and the output harmonic currents are reduced. Analysis, control and simulation for 24 pulse operation of the proposed scheme is presented and the experimental results will be provided in the final paper.

1. 서 론

세계적인 화석에너지의 고갈에 따라, 최근 태양광, 풍력 및 연료전지 등의 대체에너지를 이용한 발전시스템에 관한 연구와 상용화가 진행되고 있다. 국내에서는 1997년 "대체에너지 개발 및 이용 보급촉진법"에 의거하여 2006년까지 총 에너지 수요의 2%를 대체에너지로 공급하기 위한 기술개발과 보급목표를 설정하였으며^[1], 세계적으로는 2020년까지 총 에너지수요의 30%가 대체에너지로 공급될 전망이다^[2]. 이러한 대체에너지 발전시스템 중 잉여에너지의 역송전이 가능한 계통연계형(utility interactive) 인버터에 관한 연구가 활발하며 중대용량급의 발전시스템이 필요하게 되었고 수 MW급의 발전시스템도 계획되고 있다. 계통연계형 인버터는 IGBT등을 사용하는 PWM방식과 Thyristor를 사용하는 SCR 인버터 방식 등이 있는데 자연전류형 SCR 인버터는 스위칭손실이 작고 EMI의 발생이 적어 중대용량급에 적합하다^[3]. 그러나, 6-펄스 SCR 인버터는 출력전류에 5차 및 7차의 고

조파가 발생되어 THD가 30%를 넘게된다. 이러한 6-펄스 SCR 인버터에 보조회로를 추가하여 고조파를 저감하는 연구 중 문헌[2]에서는 1대의 Boost 컨버터와 단상정류기를 사용하여 정현파에 가까운 전류를 얻을 수 있으나 스위칭소자의 스트레스가 크고 보조회로의 PWM동작으로 EMI가 발생될 우려가 있다. 또한 문헌[3]은 2대의 Buck 컨버터를 사용하여 출력전압을 조정하고 THD가 5%미만인 전류를 얻을 수 있으나, 전력흐름에 직렬로 스위칭소자가 연결되어 손실이 적지않다. 본 논문에서는 6-펄스 자연전류형 SCR 인버터에 간단한 보조회로를 추가하여 펄스 수를 높임으로서 전류의 고조파를 저감하는 방식을 제안한다. 이 보조회로의 적절한 동작으로 인버터 시스템은 12-펄스, 18-펄스 및 24-펄스 동작이 가능하다. 제안한 방식은 전력흐름에 스위칭 소자가 직렬로 연결되어 있지 않아 손실이 적으며, 보조회로의 저주파동작으로 EMI를 발생시키지 않는 장점이 있다.

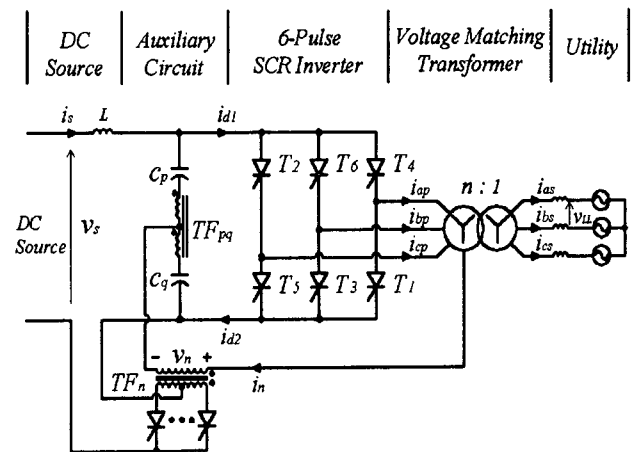


그림 1 제안하는 고펄스 SCR 인버터
Fig. 1 Proposed high pulse SCR inverter

2. 제안한 방식의 원리

제안한 방식의 전력회로를 그림 1에 나타내는데 이는 6-펄스 SCR 인버터에 보조회로를 추가하여 구성된다. 보조회로는 저용량의 단권변압기, DC Blocking 커패시터, 전류주입용 단상변압기 및 보조싸이리스터로 구성된다. 제안한 SCR 인버터 시스템을 12-펄스, 18-펄스 및 24-펄스로 동작시키기 위한 보조싸이리스터의 구성을 그림 2에 나타낸다. 24-펄스 동작을 위한 보조싸이리스터의 최적 점호각 β 는 시스템의 위상각 α 에 따라 그림 3과 같이 정해지며, 이에 따른 각 보조싸이리스터는 그림 4와 같이 동작시킨다^[4]. 각 보조싸이리스터의 도통에 따른 주입전류 i_n 은 그림 4와 같이 4-레벨을 갖는 파형이 되며 $v_n > 0$ 인 경우 각 모드별 동작 및 i_n 의 진폭은 표 1에 정리하였다. 이와 같은 주입전류 i_n 은 단권변압기 작용으로 각 DC Blocking 커패시터에 양분되어 인버터의 입력전류 i_{d1} 과 i_{d2} 는 다음과 같이 된다.

$$i_{d1} = \frac{i_n}{2} + i_s, \quad i_{d2} = -\frac{i_n}{2} + i_s \quad (1)$$

6-펄스 인버터의 주 싸이리스터는 시스템의 위상각 α 에 따라 출력측 계통전원에 의해 120° 씩 도통되는데 인버터브리지의 출력전류는 인버터브리지의 입력전류 및 스위칭함수에 의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a+}(\alpha) \\ S_{b+}(\alpha) \\ S_{c+}(\alpha) \end{bmatrix} i_{d1} + \begin{bmatrix} S_{a-}(\alpha) \\ S_{b-}(\alpha) \\ S_{c-}(\alpha) \end{bmatrix} i_{d2} \quad (2)$$

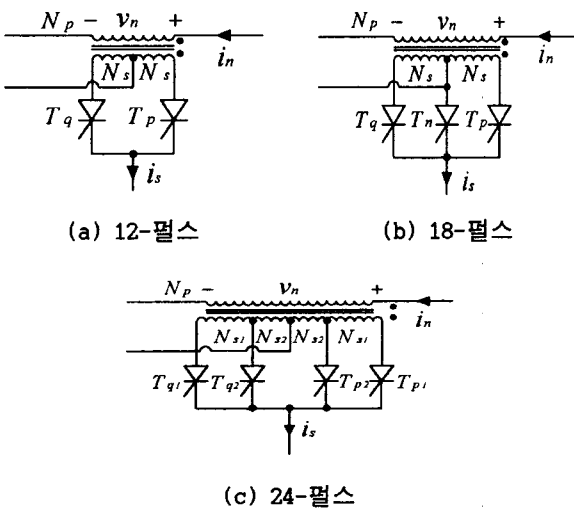


그림 2 보조싸이리스터의 연결
Fig. 2 Connection of auxiliary thyristors

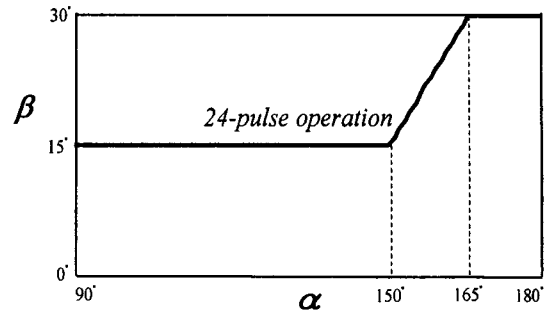


그림 3 위상각 α 에 대한 최적 점호각 β (24-펄스)
Fig. 3 Optimum firing angle β vs. phase angle α

여기서 $S_{a+}(\alpha)$ 와 $S_{a-}(\alpha)$ 는 'a' 상에 대한 스위칭함수로서 $\alpha = 0^\circ$ 에 대한 스위칭함수는 그림 5와 같다. 'b' 상 및 'c'상에 대한 스위칭함수는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} S_{b+}(\alpha) &= S_{a+}(\alpha) \angle -120^\circ \\ S_{b-}(\alpha) &= S_{a-}(\alpha) \angle -120^\circ \\ S_{c+}(\alpha) &= S_{a+}(\alpha) \angle +120^\circ \\ S_{c-}(\alpha) &= S_{a-}(\alpha) \angle +120^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

또한 Y-Y 변압기의 MMF 관계식으로부터 계통측 전원전류는 인버터 출력전류로 다음과 같이 된다.

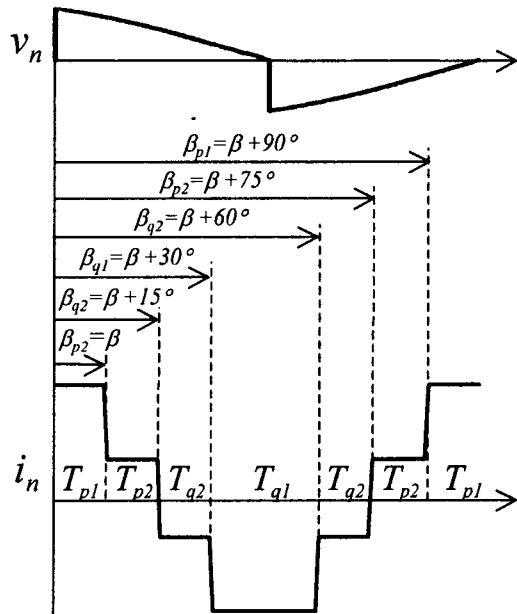


그림 4 24-펄스 시스템의 보조회로 동작
Fig. 4 Auxiliary circuit operation (24-pulse)

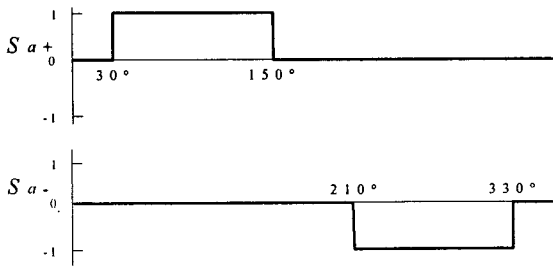


그림 5 'a' 상에 대한 스위칭 함수 $S_{a+}(0)$ 와 $S_{a-}(0)$
 Fig. 5 Switching function $S_{a+}(0)$ & $S_{a-}(0)$ for phase 'a'

$$\begin{aligned}
 i_{as} &= n \cdot i_{ap} - \frac{1}{3} i_n \\
 i_{bs} &= n \cdot i_{bp} - \frac{1}{3} i_n \\
 i_{cs} &= n \cdot i_{cp} - \frac{1}{3} i_n
 \end{aligned} \quad (4)$$

따라서 식 (1)에서 식 (4)로부터 주입전류와 계통측 전원전류는 다음과 같이 된다.

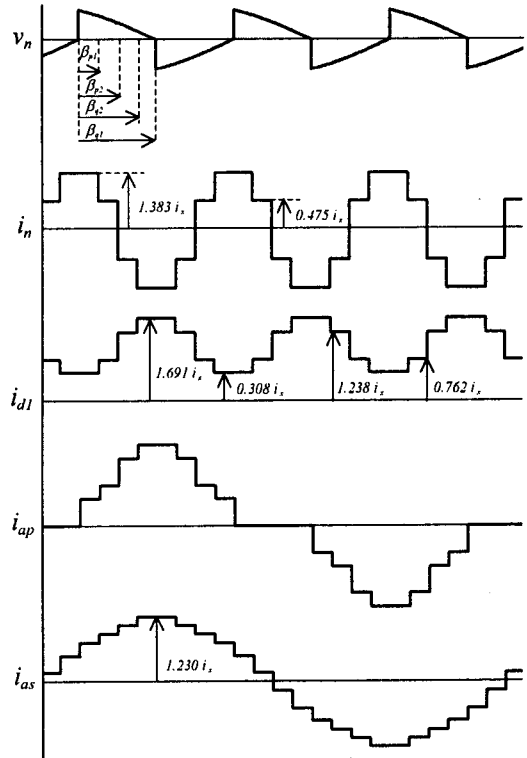


그림 6 24-펄스 시스템의 각부 파형 ($\alpha = 150^\circ$)
 Fig. 6 Various waveforms (24-pulse) ($\alpha = 150^\circ$)

표 1 모드별 동작
 Table 1 Operation of each mode

Mode	Operation	전류 i_n 의 진폭비
T_{p1} ON		$i_n = \frac{N_{s1} + N_{s2}}{N_p} i_s$
T_{p2} ON		$i_n = \frac{N_{s2}}{N_p} i_s$
T_{q2} ON		$i_n = -\frac{N_{s2}}{N_p} i_s$
T_{q1} ON		$i_n = -\frac{N_{s1} + N_{s2}}{N_p} i_s$

$$\begin{aligned}
 i_m &= \frac{i_n}{6} (3nS_{a+}(\alpha) - 3nS_{a-}(\alpha) - 2) + i_s (nS_{a+}(\alpha) + nS_{a-}(\alpha)) \\
 i_m &= \frac{i_n}{6} (3nS_{b+}(\alpha) - 3nS_{b-}(\alpha) - 2) + i_s (nS_{b+}(\alpha) + nS_{b-}(\alpha)) \\
 i_m &= \frac{i_n}{6} (3nS_{c+}(\alpha) - 3nS_{c-}(\alpha) - 2) + i_s (nS_{c+}(\alpha) + nS_{c-}(\alpha))
 \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 보면 계통측 전원전류는 주입전류 i_n 의 함수임을 알 수 있다. 즉, 전원전류는 변압기 TF_n 의 권선비와 각 보조싸이리스터의 점호각에 따라 변하며, 24-펄스 동작의 경우 최적의 권선비는 $N_{s1}/N_p = 0.908$ 이고, $N_{s2}/N_p = 0.475$ 이다^[4]. 그림 6에 $\alpha = 150^\circ$ 일 때 각부의 전류파형을 나타낸다. 계통측 전원전류는 24-펄스의 특성을 갖게 되며 THD는 7.4% 이다. 또한, 12-펄스 및 18-펄스 동작의 원리는 문헌^[4]에 있으며 이와 같은 방식으로 30-펄스, 36-펄스등의 동작도 가능하다.

한편 제안한 방식의 전류제어를 위한 제어블럭도를 그림 7에 나타낸다. 여기서 전류지령치는 최대출력 제어기(Maximum Power Point Tracking)로부터의 출력일 수 있다. 이 전류지령으로부터 시스템의 위상각 α 가 결정되며 또한 이 시스템의 위상각 α 로부터 그림 3에 의한 보조싸이리스터의 최적점호각 β 가 결정된다. 보다 정밀한 제어를 위하여 주 인버터에는 선간전압 V_{ac} 의 영전위검출신호와 PLL

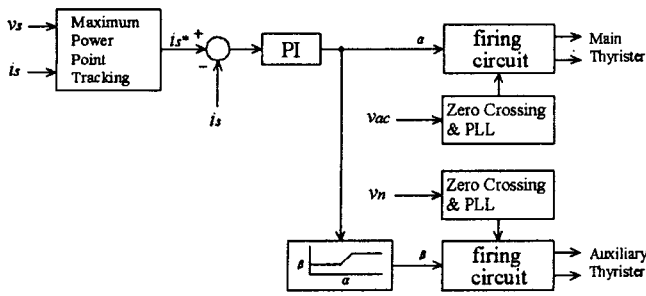


그림 7 제어 블록도
Fig. 7 Control block diagram

회로에 의한 동기화와 보조싸이리스터에는 변압기 TF_n의 1차측 전압 v_n 의 영전위검출신호와 PLL 회로에 의한 동기화가 각각 필요하다. 한편 주 인버터 시스템의 위상각은 120° 와 170° 사이에서 동작한다고 가정하면 변압기 및 각 스위칭소자에는 $\alpha = 120^\circ$ 일 때 최대전압이 걸리므로 이때의 변압기 및 각 스위칭소자의 정격을 구하여 표 2에 정리하였다.

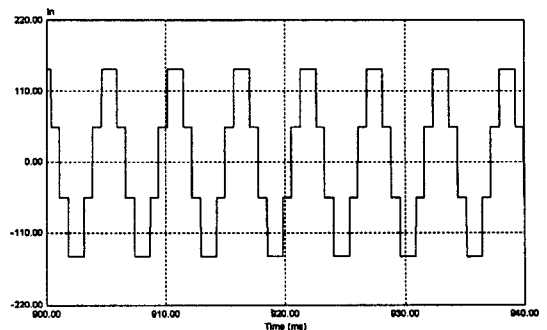
3. 시뮬레이션

그림 8에 PSIM에 의한 시뮬레이션 결과 각부 전류파형을 나타낸다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같이 설정하였다.

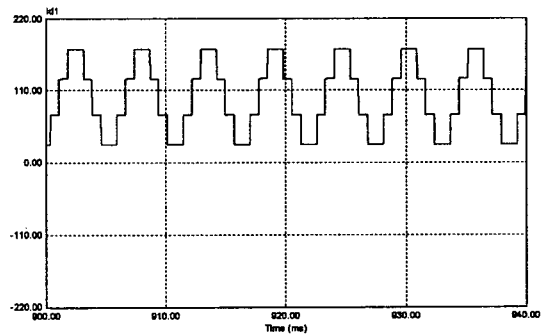
- 계통 선간전압 $V_{LL} = 380V$
- Y-Y 변압기 권수비 $n = 1$
- 최대 출력전력 $P_o = 50KVA$
- 직류전원 공칭전압 $v_{s,nominal} = 450V$
- 전류지령치 $i_s^* = 100A$
- 공칭 위상각 $\alpha_{nominal} = 151.3^\circ$

표 2 변압기 및 소자의 정격 ($\alpha = 120^\circ$)
Table 2 Transformer VA & component rating ($\alpha = 120^\circ$)

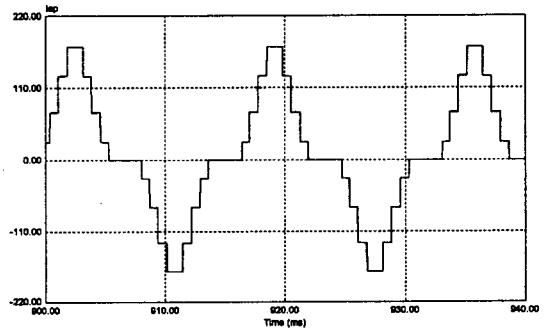
제안한 24-펄스 시스템		
변압기 TF _{po}	V_{rms} / v_s	0.500
	I_{rms} / i_s	0.516
	$VA(\%) / v_s \cdot i_s$	25.95
변압기 TF _n	V_{rms} / v_s	0.447
	I_{rms} / i_s	1.022
	$VA(\%) / v_s \cdot i_s$	45.88
Main 싸이리스터	V_{peak} / v_s	0.955
	I_{peak} / i_s	1.691
	I_{rms} / i_s	0.649
보조 싸이리스터	V_{peak} / v_s	0.276
	I_{peak} / i_s	1.000
	I_{rms} / i_s	0.500



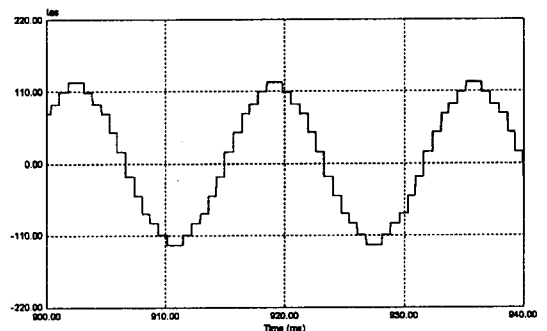
(a) i_n



(b) i_{d1}



(c) i_{ap}



(d) i_{as}

그림 8 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Simulation waveforms

시뮬레이션 파형은 스위칭함수에 의한 이론적인 분석과 일치함을 알 수 있다.

4. 결 과

본 논문에서는 대체 에너지(풍력, 태양력, 연료전지등)를 위한 발전 시스템에서 자연전류형 SCR 인버터를 사용하여 3상 계통전원에 접속할 때 발생하는 고조파 전류를 간단한 보조회로를 부착함으로써 제거하는 새로운 방식을 제안했다. 제안한 방식으로 계통전류의 펄스 수를 12-펄스, 18-펄스 및 24-펄스로 증가시킬 수 있으며 PSIM에 의한 시뮬레이션(24-펄스)으로 본 방식에 타당성을 입증하였다. 또한 본 방식은 이론적으로 펄스 수를 30-펄스, 36-펄스등과 같이 계속 증가시킬 수 있다. 최종본 논문에서는 3KVA급 시작품으로부터의 실험과형을 제시하고자 한다.

이 논문(관리번호 98-중-03)은 한국 전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 연구되었습
--

참 고 문 헌

- [1] 송진수, 윤경훈, 유권중, "태양광 발전기술의 개발 및 보급동향" 2000년 대한전기학회 하계학술대회논문집 pp. 1506 ~1509, 2000, 7월.
- [2] Ali M. TI-Tamaly, P. N. Enjeti, H. H. TI-Tamaly, " An Improved Approach to Reduce Harmonics in the Utility Interface of Wind, Photovoltaic and Fuel Cell Power Systems," IEEE APEC Conference, Vol. 2, pp. 1059~1065, 2000
- [3] R. Naik, N. Mohan, Mark Rogers, Alec Bulawka, " A Novel Grid Interface, Optimized for Utility-Scale Applications of Photovoltaic, Wind-Electronic, and Fuel-Cell Systems," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, 1995, October.
- [4] Sewan Choi, Jaehyuck Jung, "New Pulse Multiplication Technique Based on 6-Pulse Thyristor Converters for High Power Applications," IEEE APEC Conference, Vol. 2, pp. 800~805, 3, 2001.