

창립
40주년 학술대회
논문 87-J-20-7

3상 전류제어형 PWM 정류기의 특성 개선을
위한 제어기법에 관한 연구

박민호
서울대

최재호
충북대

이지준근
* 서울대

강준구
서울대

STUDY ON CONTROL SCHEME FOR IMPROVEMENT OF
THREE PHASE CURRENT-CONTROLLED PWM RECTIFIER

Min Ho Park
Seoul Nat'l Univ.

Jae Ho Choi
Chungbuk Univ.

Jun Keun Ji
Seoul Nat'l Univ.

Jun Koo Kang
Seoul Nat'l Univ.

Abstract - A high-performance PWM technique in current-controlled AC to DC converter is introduced. This converter used information about source voltage vectors to make good PWM switching pattern that it can control the DC output voltage with reduced ripple factor and rapid response. In addition to reduction of harmonic current, AC input power factor can be controlled to leading or lagging by current reference. Simulation was made based on analytical approach and it showed a good agreement with theory.

I. 서론

직류전압 제어방식에 의해 DC측 리액터를 제거하고, 양방향 전류도통 기능을 가진 전압형 정류기에 전류제어 PWM방식을 도입하여 고유입력전류를 정현파에 가깝게 제어함으로써 저차 고조파 제거용 필터 용량을 줄이고 출력전압의 맥동을 억제하며, 기준전류의 위상을 변화시켜서 동상 및 진상 역률을 얻을 수 있게 함으로써 역률보상기 및 무효전력 보상장치로 사용할 수 있는 전류제어형 PWM정류기에 대한 연구가 진행되어 왔다.

이때 전류제어방식으로는 hysteresis 방식, 삼각파 변조방식, predictive 방식 등이 있다. hysteresis 방식은 응답특성이 좋고 간단한 반면에 스위칭 주파수와 맥동이 큰 단점이 있고, 삼각파 변조방식은 제어하기가 쉽고 스위칭 주파수가 제한되는 반면에 전류의 크기 및 위상 오차와 multiple crossing 이 생겨 보상장치가 필요하다. 한편 predictive 방식은 정확한 반면 부하특성에 대한 정보가 필요하고 계산지연시간과 제작상의 어려움 등이 따른다.

상기한 전류제어방식으로는 입력전류고조파 성분을 줄이며, 응답특성을 개선하는 상반된 요구를 동시에 만족시키기에는 어려운 점이

있었다. Nabae는 전류오차벡터를 제어함으로써 PWM인버터에서 이상의 목적을 이룰 수 있는 제어방식을 제안하였다.

본 연구에서는 직류출력전압 규환에 의한 PWM정류기에 이 방식을 도입할 때, 인버터와는 달리 부하 역기전력이 전원전압으로 대치되는 대 다른 장치의 간편화를 이룰 수 있다는 점에 착안하여 직류출력전압 맥동을 줄이고, 바쁜 응답특성을 가지면서 입력전류고조파 성분을 억제하도록 하였다. 또한 전원전압으로부터 기준전류의 위상을 취함으로써 동상뿐만 필요에 따라서 진상 및 지상 역률을 얻을 수 있도록 하였다.

II. 시스템 해석

그림 1은 전압형 정류기의 기본구성도를 보여준다. 정류기의 출력단에 역기전력 E_C 를 발생하는 부하를 가정하고 시스템의 상태방정식을 세우면식(1)로 주어진다.

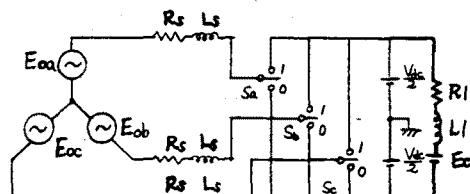


그림 1. 전압형 정류기의 구성도

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_q \\ I_d \\ I_L \\ V_{dc} \end{pmatrix} = & \begin{pmatrix} -R_s/L_s & 0 & 0 & S_q/L_s \\ 0 & -R_s/L_s & 0 & S_d/L_s \\ 0 & 0 & -R_L/L_L & -I_L/L_L \\ -S_q/C & -S_d/C & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_q \\ I_d \\ I_L \\ V_{dc} \end{pmatrix} \\ & + \begin{pmatrix} -1/L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_q \\ E_d \\ E_C \\ E_C \end{pmatrix} \quad (1) \end{aligned}$$

3상 전류제어형 PWM 정류기의 특성 개선을 위한 제어기법에 관한 연구

여기서 S_d, S_q 는 다음의 전류제어 방식에 의해 결정된 스위칭 모드에 따라 표 1로부터 구해진다.

$V(k)$	$k=0$	$k=1$	$k=2$	$k=3$	$k=4$	$k=5$	$k=6$	$k=7$
S_{abc}	000	100	110	010	011	001	101	111
S_q	0	$\frac{2}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{2}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	0
S_d	0	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	0

표 1. $V(k)$, S_{abc} , & S_q, S_d .

III. 전류 제어부

1. 전류제어 이론

그림 1의 회로방정식을 전압, 전류벡터로서 나타내면 식(2)와 같다.

$$L \frac{di}{dt} + R_i + E_o = \bar{V}(k) \quad (2)$$

i : 전류 벡터

E_o : 전원 전압 벡터

식(2)에서 $\bar{V}(k)$ 는 정류기의 스위칭 전압 벡터로서 표 1에서 보는 것처럼 스위치의 ON-OFF 상태에 따라 8가지 모드가 있다. 전류제어를 위한 기준전류 벡터를 i^* 라 하면 전류오차 벡터 Δi 는

$$\Delta i = i^* - i \quad (3)$$

로서 주어지고, $R\Delta i$ 를 무시하면

$$L \frac{di}{dt} = \bar{E} - \bar{V}(k) \quad (4)$$

$$\text{단, } \bar{E} = L \frac{di^*}{dt} + R\bar{i}^* + E_o \quad (5)$$

식(4)로부터, $d\bar{i}/dt$ 는 $\bar{V}(k)$ 의 선택에 의해 결정된다. Δi 를 줄이기 위해서는 $d\bar{i}/dt$ 의 방향이 Δi 와 반대방향이 되어야 하는데, 바른 전류 응답 특성을 위해서는 크기가 최대가 되도록 하고, 전류 고조파 성분을 줄이기 위해서는 크기가 최소가 되도록 하는 $\bar{V}(k)$ 를 선택한다.

(1) 전류 고조파 성분을 줄이기 위한 스위칭 전압 벡터의 선택

그림 2에서 보는 것처럼 \bar{E} 를 포함하는 삼각형의 경계에 해당하는 3개의 스위칭 전압 벡터 중에서 하나를 선택한다. \bar{E} 와 Δi 의 영역을 3상 전원 전압 E_{abc} 와 전류오차 Δi_{abc} 로부터 크기 및 극성을 비교하여 알고나면 스위칭 전압 벡터를 결정할 수 있는데, 그림 3에 이것을 도시하였다.

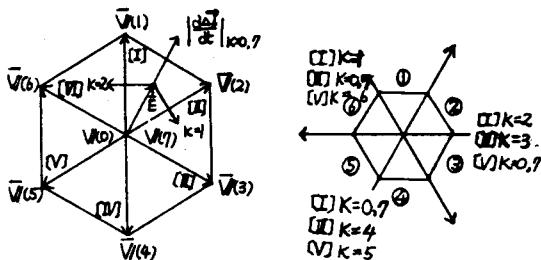


그림 2. \bar{E} 의 영역에 대한 육각형 그림 3. Δi 의 영역에 대한 육각형

(2) 바른 전류 응답 특성을 위한 스위칭 전압 벡터의 선택

과도상태에서 Δi 가 크다면, 바른 전류 응답 특성을 위한 스위칭이 필요하며, 이를 위해서는 $d\bar{i}/dt$ 가 Δi 에 반대방향으로 최대 크기를 갖도록 하는 스위칭 전압 벡터를 선택한다.

이때 Δi 의 bandwidth에 의하여 전류 고조파 성분을 줄이는 스위칭과 바른 전류 응답 특성을 가지는 스위칭의 시스템 모드를 결정한다.

2. 제어장치의 구성

전류제어장치는 그림 4, 전체 시스템 구성도는 그림 5와 같다. 그림 4의 시스템 스위칭 모드 선택부는 Amplitude Comparator의 출력 신호에 따라 스위칭 모드를 결정하고, \bar{E} 와 Δi 의 영역을 나타내는 입력 신호에 따라 원하는 스위칭 전압 벡터를 선택하여 Power Tr. 을 구동해 준다.

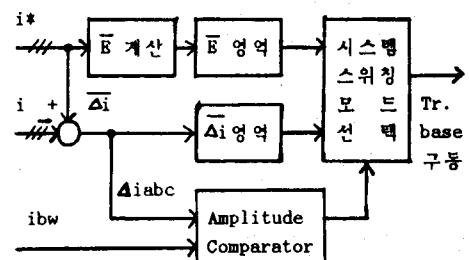


그림 4. 전류제어장치

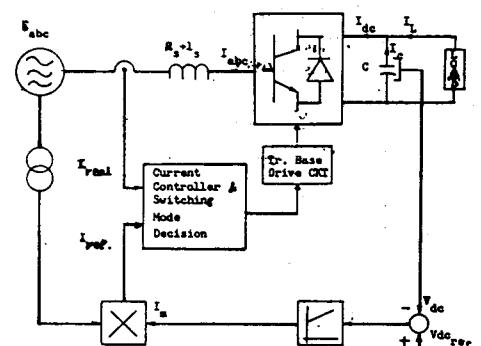
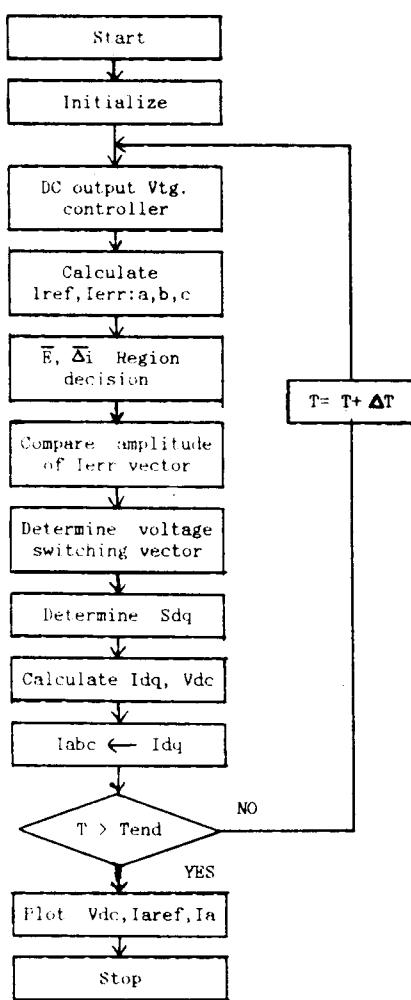


그림 5. 전체 시스템 구성도

IV. 시뮬레이션

소개한 전류제어 방식을 사용한 PWM 정류기가 목적하는 동작 특성을 나타낸을 보이기 위하여 앞절에서 구성한 전류제어장치를 포함한 전체 시스템을 Computer 시뮬레이션 하였으며 전체 Program의 순서도는 그림 6과 같다.

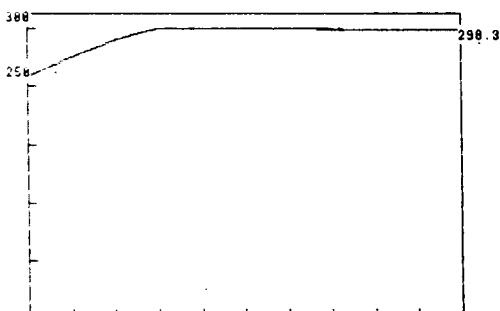


동상인 경우의 Rectifying 모드와 Inverting 모드에서의 직류 출력전압특성과 교류 입력전류특성을 그림 7과 그림 8에서 보여준다.

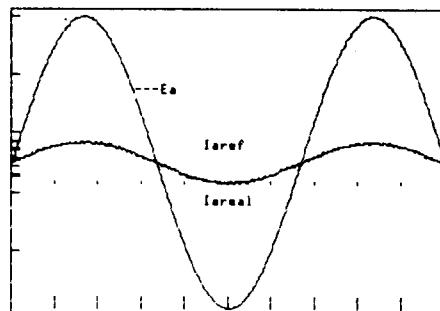
(1) Rectifying 모드

초기조건으로 $V_{dc}=250[V]$, 기준전압 $300[V]$ 을 주었을 때 전압과 전류파형은 그림 7의 a, b와 같다.

$V_{dcmax} = 299.0409 [V]$



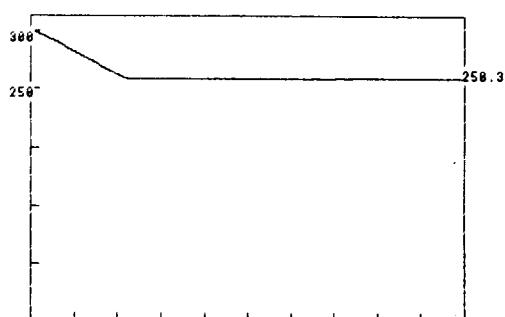
$E_{amax} = 141.4 [V]$ $E_{amin} = -141.4 [V]$
 $I_{amax} = 21.28785 [A]$ $I_{amin} = -20.90000 [A]$



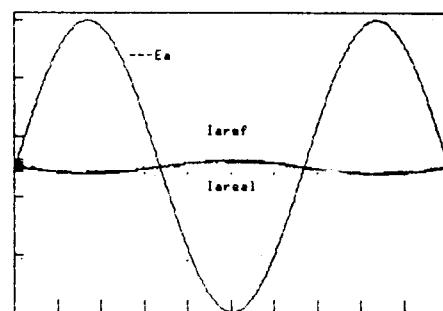
(2) Inverting 모드

초기조건으로 $V_{dc}=300[V]$, 기준전압 $250[V]$ 을 주었을 때 전압과 전류파형은 그림 8의 a, b와 같다.

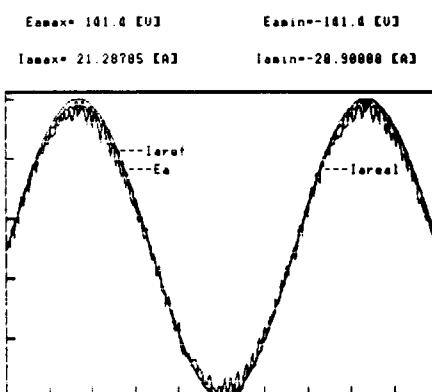
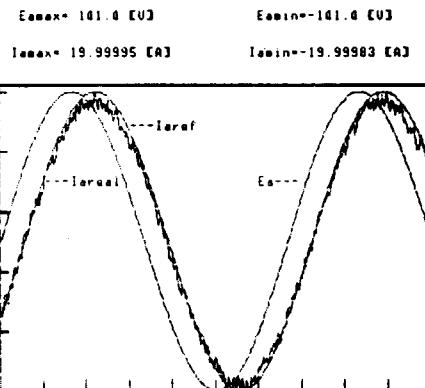
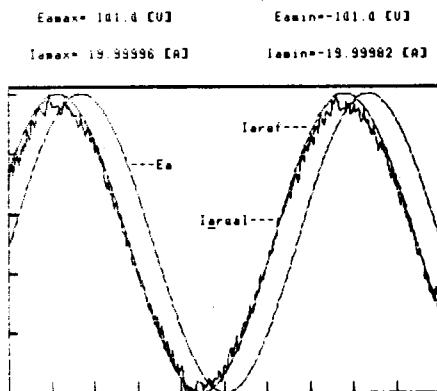
$V_{dcmin} = 269.4205 [V]$



$E_{amax} = 141.4 [V]$ $E_{amin} = -141.4 [V]$
 $I_{amax} = 7.89354 [A]$ $I_{amin} = -7.646131 [A]$



그리고 교류 입력전류가 전원전압에 대해서 위상이 30도 진상인 경우와 지상인 경우의 교류 입력전류특성을 그림 9의 a, b에서 보여준다. 그림 9.c는 동상인 경우이다.



V. 결론

본 연구에서는 직류 출력전압 규환에 의한 PWM 정류기에 새로운 전류제어방식을 도입할 때 출력전압의 제어기능을 만족할 뿐 아니라, 전류 고조파 성분을 줄이고 따른 응답 특성을 갖는다는 것과, 동상뿐만 아니라 전상과 지상의 역률을 얻을 수 있는 역률보상의 기능까지 잘 만족하는 것을 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

차후의 연구과제로 전원 전압벡터의 크기에 대한 사전 정보를 이용하여 보다 정확한 스위칭 모드가 결정되도록 하는 것과, 직류측 단락을 방지하기 위한 Lock-Out 회로에서의 Dead-time 및 제어회로에서의 Delay를 고려한 해석 등이 요망된다.

VI. 참고 문헌

1. D.M. Brod and D.W. Novotny, "Current control of VSI-PWM inverters," IEEE-IAS Conf. Rec., 1984, pp. 418-425.
2. 박 민호외, "3상 전류제어형 PWM 정류기의 해석 및 시뮬레이션," 전기전자공학 학술대회 논문집, 1987/7, pp. 809-812.
3. B.T. Ooi, J.W. Dixon, A.B. Kulkarni, and M. Nishimoto, "An Integrated AC Drive System Using a Controlled-Current PWM Rectifier/Inverter Link," IEEE-IPEC Conf. Rec., 1986, pp. 494-501.
4. P. Enjeti, P.D. Ziogas, J.F. Lindsay, and M.H. Rashid, "A Novel Current Controlled PWM Inverter for Variable Speed AC Drives," IEEE-IAS Conf. Rec. 1980 , pp. 235-243.
5. A. Nabae, S. Ogasawara, H. Akagi, "A novel control scheme of current controlled PWM inverters," IEEE-IAS Conf. Rec., 1985, pp. 473-478.