

일반화정결합조종에 의한 단상PWM승압정류기의 조종성능개선

김명철, 정향남

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우자면 발전된 과학기술을 받아들이는것과 함께 새로운 과학기술분야를 개척하고 그 성과를 인민경제에 적극 받아들여야 합니다.》
(《김정일선집》 증보판 제11권 138~139페이지)

우리는 전압반결합조종과 일반화정결합조종을 결합하여 단상승압정류기의 조종성능을 개선하기 위한 연구를 하였다.

전력변환은 최근년간 축전지충전, 안정된 전압원천, UPS체계 등 여러가지 전력전자용에서 매우 중요하다.

이전의 대부분의 조종체계들은 많은 전압, 전류수감부들을 리용하여 내부에 전류고리, 외부에 전압고리를 가진 종속조종방식으로 구성되였다. 그러나 정류기의 입구전압이 불안정하거나 부하가 급격히 변하는 경우 출구전압이 안정되지 못하고 편차가 매우 심한것과 함께 전력변환효율이 낮은 결함이 있다.[2, 3]

본문에서는 단상PWM승압정류기에서 일반화정결합조종에 의하여 목표량추종특성과 외란억제특성을 개선하는 한가지 방법을 제안하였다.

1. 단상승압정류기의 저항모방조종

저항모방조종식 단상PWM승압정류기와 그 등가회로[1]를 그림 1에 보여주었다.

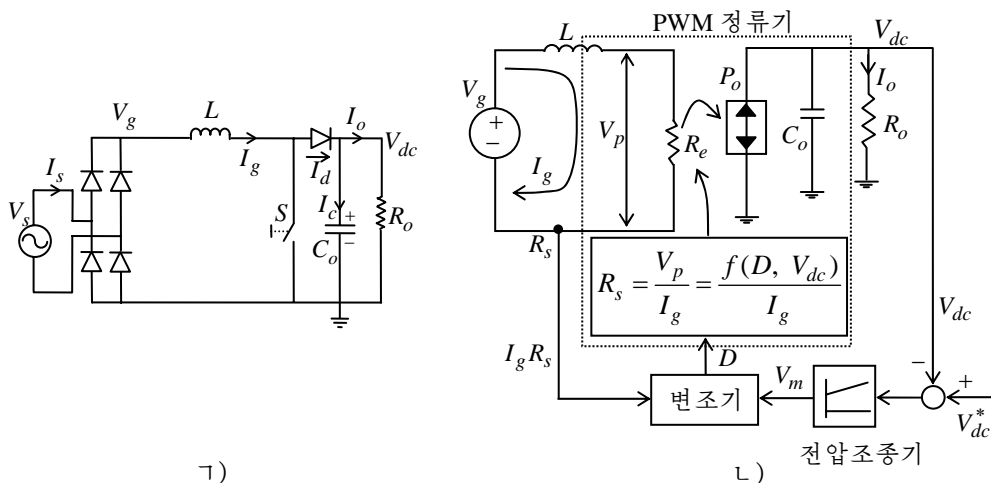


그림 1. 단상PWM승압정류기(가)와 그 등가회로(나)

여기서 V_s 는 교류입구전압, I_s 는 교류입구전류, S 는 절환요소, V_{dc}^* 는 설정전압, V_m 은 전압조종기의 출력, V_p 는 평균극전압, I_g 는 평균입구전류, L 은 유도선류, C_o 는 출구콘덴서, V_g 는 입구전압, R_e 는 무손실저항, R_s 는 전류수감저항, I_o 는 부하전류, R_o 는 부하저항이다.

극전압 V_p 는 출구전압 V_{dc} 와 절환요소 S 의 충만비 D 의 함수로서 다음식으로 표시할 수 있다.

$$V_p = f(V_{dc}, D) \quad (1)$$

저항모방조종의 목적은 승압정류기의 입구단의 저항이 무손실저항 R_e 와 같도록 즉 극전압이 $V_p = I_g R_e$ 가 되도록 하여 입구력률이 1이 되도록 하는것이다.

유도선류의 저항 X_L 이 저항 R_e 에 비하여 무시할만큼 작다면 입구력률은 거의 1과 같게 되며 평균극전압 V_p 는 입구전압 V_g 와 거의 같게 된다.

$$V_p = I_g R_e \approx V_g \quad (2)$$

저항 R_e 에서 소비되는 전력은 내부적으로 출구단으로 넘어간다.

정상상태에서의 PI형전압조종기의 출력 V_m 은 다음과 같이 표시된다.[1]

$$V_m = \frac{V_{dc} R_s}{R_e} \quad (3)$$

한편 승압정류기가 련속유도방식으로 동작하므로 평균극전압은

$$V_p = (1-D)V_{dc} \quad (4)$$

이며 따라서 식 (2)–(4)에 의하여 조종법칙을 구하면 다음과 같다.

$$D = 1 - \frac{I_g R_s}{V_m} \quad (5)$$

입구전압 V_g 와 평균입구전류 I_g , 표준화된 입구전압 m_g 가 다음과 같이 표시된다고 하자.

$$V_g = V_{gm} \sin \omega t \quad (6)$$

$$I_g = \frac{V_g}{R_e} = I_{gm} \sin \omega t \quad (7)$$

$$m_g = \frac{V_g}{V_{dc}} = M_g \sin \omega t \quad (8)$$

여기서 V_{gm} 은 최대입구전압, I_{gm} 은 평균입구전류의 최대값, M_g 는 표준화된 입구전압의 최대값, $M_g = V_{gm}/V_{dc}$ 이다.

내부손실을 무시한다면 입출구전력평형방정식은 다음과 같다.

$$P_o = \frac{V_{gm}^2}{2R_e} = V_{dc} I_o = \frac{V_{dc}^2}{R_o} \quad (9)$$

한편 입구측전압과 출구측전류의 방정식은 다음과 같다.

$$V_L = L \frac{dI_g}{dt} + R_L I_g = V_g - V_p \quad (10)$$

$$I_d = C_o \frac{dV_{dc}}{dt} + \frac{V_{dc}}{R_o} \quad (11)$$

식 (1)–(4)와 식 (10), (11)을 리용하여 정류기의 평균화모형을 구하면 다음과 같다.

$$V_L = V_g - \left(\frac{I_g R_s}{V_m} \right) V_{dc} \quad (12)$$

$$I_d = \frac{I_g^2 R_s}{V_m} \quad (13)$$

식 (12), (13)은 비선형이며 이 식들을 정상상태에서의 V_g , V_m , V_{dc} , I_g 의 동작점근방에서 선형화하여 미소신호의 라플라스변환모형을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_L(s) &= \hat{v}_g - R_e \hat{i}_g(s) - m_g \hat{v}_{dc}(s) + (m_g R_e / R_s) \hat{v}_m(s) \\ \hat{i}_d(s) &= 2m_g \hat{i}_g(s) - (m_g^2 / R_s) \hat{v}_m(s) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 \hat{v}_L , \hat{v}_g , \hat{i}_g , \hat{v}_{dc} , \hat{v}_m , \hat{i}_d 는 각각 V_L , V_g , I_g , V_{dc} , V_m , I_d 의 미소신호들이다.

식 (10)–(14)와 PI조종기

$$G_V(s) = \frac{\hat{v}_m(s)}{\hat{e}_V(s)} = \frac{K_V(1+sT_V)}{sT_V} \quad (15)$$

로부터 닫힌체계를 구성하였을 때 체계는 저항 R_e 를 비례조절기로 하는 고유한 전류조종고리를 포함한다는것을 알수 있다.

전류고리의 주파수대역이 전압고리의 주파수대역에 비하여 훨씬 크기때문에 전류고리를 무시하고 조종량 \hat{v}_m 으로부터 출구전압의 미소신호 \hat{v}_{dc} 까지의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$G_{PV}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{v}_m(s)} = \frac{G_{PV0}}{1+sT_{PV0}} \quad (16)$$

여기서

$$G_{PV0} = \frac{m_g^2 R_o / R_s}{1 + 2m_g^2 R_o / R_e}, \quad T_{PV0} = \frac{R_o C_o}{1 + 2m_g^2 R_o / R_e}$$

이다.

조종기 (15)의 파라미터들은 모형 (16)과 입구전류의 이치러집허용값에 기초하여 선택한다. T_V 는 모형 $T_V = T_{PV0}$ 으로 선택한다. 다음으로 파라미터 K_V 는 K_V 가 커지면 입구전류의 이치러집이 커지게 되므로 입구전류이치러집에 따라 알맞게 선택한다.

조종기 (15)에 의한 닫힌체계는 정상상태에서 출구DC전압의 안정화를 실현한다. 그러나 입구측과 부하측에서의 변동, 설정값의 변화에 대해서는 출구응답특성이 조종목적의 요구에 부합되지 않는다.

이 문제는 섭동보상원리를 적용하여 아래에서 보는 정결합조종으로 해결할수 있다.

2. 일반화정결합조종에 의한 섭동보상

정결합조종기를 설계하기 위하여 정상상태에서의 전압조종기 (15)의 출력을 고찰하자.

그림 1에서 보는바와 같이 입구전력 P_{in} 은 입구전압 V_g 와 조종변수 V_m 에 관계되며

P_{in} 을 조절할수 있는 조종변수는 V_m 이다. 한편 정상상태출력 P_o 는 부하전류 I_o 에 의하여 완전히 결정된다.

식 (2)와 (9)에 의하여 조종기 (15)의 출력 V_m 은 다음과 같이 표시된다.

$$V_m = 2I_o R_S \left(\frac{V_{dc}^*}{V_{gm}} \right)^2 \quad (17)$$

식 (17)에 의하여 정상상태에서의 입구전력과 출구전력사이의 균형이 이루어진다.

만일 입구전력과 출구전력사이 균형이 순간적으로 변동되는 경우 출구콘덴사 C_o 는 순간적으로 방전 및 과충전되며 출구전압에는 큰 맥동이 존재하게 된다.

조종과라메터 V_m 을 출구전력에 따라 빨리 변화시킬수 있다면 우의 과도현상은 현저하게 줄어들며 입출구전력평형이 복귀되게 된다.

이로부터 조종기 (15)에 식 (17)의 오른쪽항을 부가시켜 조종기를 다음과 같이 구성한다.

$$V_m = V_{m(VC)} + V_{m(FF)} = V_{m(VC)} + 2I_o R_S \left(\frac{V_{dc}^*}{V_{gm}} \right)^2 \quad (18)$$

여기서 $V_{m(VC)}$ 는 PI조종기의 출력이며 $V_{m(FF)}$ 는 정결합항이다.

식 (18)의 정결합항 $V_{m(FF)}$ 는 비선형이며 입구전압과 부하전류 그리고 출구전압설정값에서의 섭동을 보상하기 위한 일반화된 조종량이다. 이것은 다음의 미소신호해석에 의하여 알수 있다.

정결합항을 정상상태동작점 M_g , I_o 근방에서 선형화하고 미소신호의 라플라스변환모형을 구하면 다음과 같다.

$$\hat{v}_{m(FF)}(s) = \frac{2R_S}{M_g^2} \hat{i}_o(s) + \frac{4R_S}{R_o M_g^2} \hat{v}_{dc}^*(s) - \frac{2R_S}{R_e M_g} \hat{v}_{gm}(s) \quad (19)$$

여기서 $\hat{v}_{m(FF)}$, \hat{v}_{dc}^* , \hat{i}_o , \hat{v}_{gm} 은 각각 $V_{m(FF)}$, V_{dc}^* , I_o , V_{gm} 의 미소신호들이다.

그림 2에 단상승압정류기의 일반화정결합조종체계의 구성도를 보여주었다.

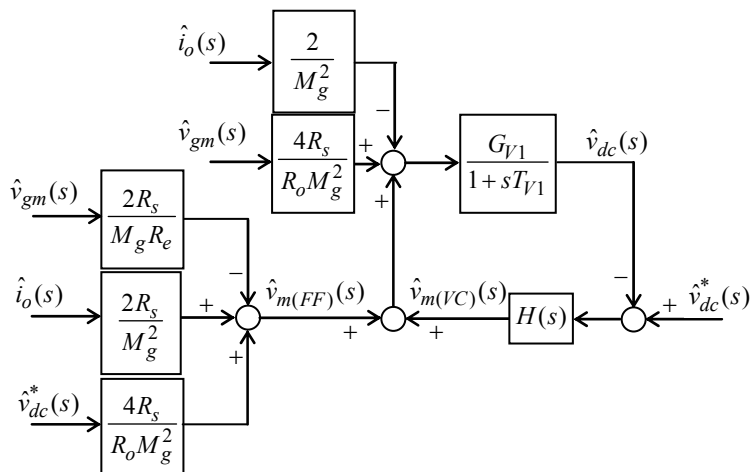


그림 2. 단상승압정류기의 일반화정결합조종체계의 구성도

입구전압의 변화 \hat{v}_{gm} 과 출구전류의 변화 \hat{i}_o 의 영향은 정결합조종력에 의하여 완전히 보상된다. 한편 설정값변화 \hat{v}_{dc}^* 에 의한 정결합조종력은 체계에 직접 전압조종기와 병렬로 작용하여 전압고리의 비례증폭도를 증대시켜 속응성을 개선한다.

3. 실험결과 및 분석

제안한 방법에 따라 설계제작한 단상승압정류기의 파라미터들은 다음과 같다.

- 정격출구전력 P_o : 600W
- 정격입구전압 V_g : 110V
- 정격출구전압 V_{dc} : 215V
- 계통주파수 f : 50Hz
- 여단이주파수 f_{sw} : 10kHz
- 전류수감증폭도 R_s : 0.5Ω
- $\Delta i_{g(max)}/I_{gm}$: 0.1
- $\Delta v_{dc(max)}/V_{dc}$: 0.04

이로부터 L 과 C_o 는 다음과 같이 계산된다.[1]

$$L = \frac{M_g V_{dc}^2}{8 P_o f_{sw} \left(\frac{\Delta i_{g(max)}}{I_{gm}} \right)} \approx 7 \text{mH} \quad , \quad C_o = \frac{P_o}{\omega V_{dc}^2 \left(\frac{\Delta v_{dc}}{V_{dc}} \right)} \approx 1032 \mu\text{F}$$

그림 3에 각이한 입구전압과 부하에 따르는 정류기의 모의실험결과를 보여주었다.

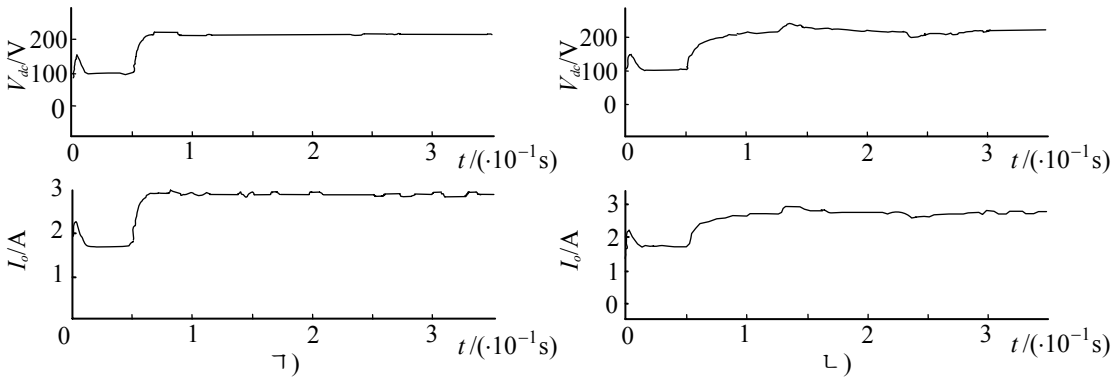


그림 3. 입구전압이 90V, 45Hz로부터 140V, 45Hz로 변화될 때 부하 600W에 대한 전압전류파형
 ㄱ) 정결합조종이 있는 경우, ㄴ) 정결합조종이 없는 경우

위의 파라미터들에 기초하여 PI조종기 (15)와 일반화정결합조종기 (19)를 구하고 MATLAB/Simulink를 통하여 단상PWM승압정류기의 목표량추종특성과 외란억제특성에 대하여 모의하였다.

그림 4에 각이한 부하에 따르는 정류기의 모의실험결과를 보여주었다.

위의 모의결과들을 통하여 제안한 일반화정결합조종방식이 정결합조종을 적용하지 않은 방식에 비하여 체계의 동특성을 뚜렷이 개선하며 출구전압이 입구전압변동과 부하

변동에 관계없이 일정하게 유지된다는것을 알수 있다.

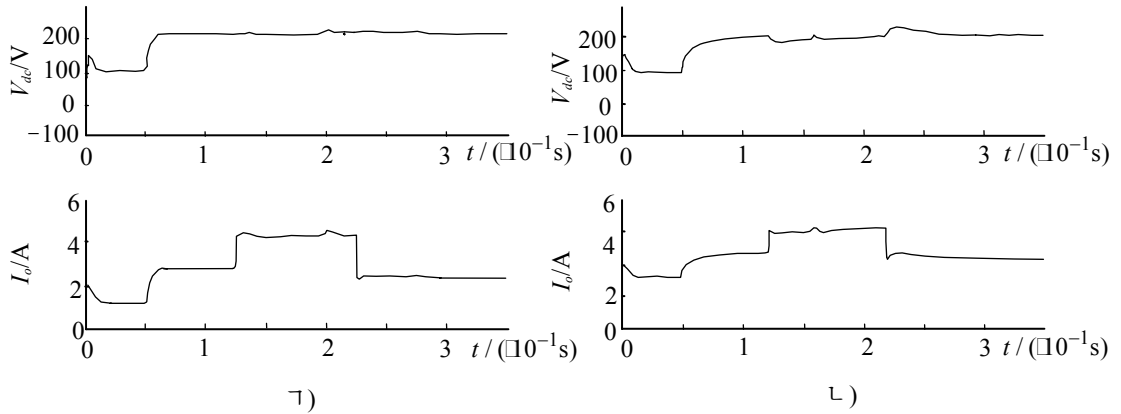


그림 4. 입구전압이 110V, 45Hz일 때 부하가 500W로부터 900W까지 변화될 때 전압전류파형
 ㄱ) 정결합조종이 있는 경우, ㄴ) 정결합조종이 없는 경우

맺는 말

저항모방조종방식의 단상PWM승압정류기에서 전압반결합조종에 일반화정결합조종을 결합시켰을 때 닫힌체계의 설정전압에 대한 추종특성과 입구전압, 부하의 급격한 변화에 대한 억제특성은 현저히 개선된다.

참고 문헌

- [1] 김일성종합대학학보 정보과학, 64, 1, 112, 주체107(2018).
- [2] Nathabhat Phankong; Energy Procedia, 56, 574, 2014.
- [3] Liu Qingfeng et al.; Physics Procedia 24, 2053, 2012.

주체107(2018)년 11월 5일 원고접수

Control Performance Improvement of the Single-phase PWM Boost Rectifier Using Generalized Feedforward Control

Kim Myong Chol, Jong Hyang Nam

In this paper, the generalized feedforward control scheme has been proposed for the single-phase PWM boost rectifier, to improve the dynamic response of the output voltage and the input current against sudden changes in the input voltage, load current and reference voltage. The simulation results have proved the effectiveness of the proposed generalized feedforward control.

Key words: single-phase PWM rectifier, small-signal model, feedforward control