

## 고조파보상을 리용하여 계통연결형역변환기의 출구전류특성을 개선하기 위한 한가지 방법

김철준, 한명성

현재 태양에너지와 풍력, 지열을 비롯한 자연에너지를 리용하여 전력을 생산하는 분산형전력생산체계가 구축되어 국가전력계통에 전력을 공급하고있다. 이러한 역변환기들에서는 전력생산과정에 많은 고조파들이 발생되어 국가전력망의 력률과 질에 영향을 주고있다.[1, 2] 이로부터 세계적으로 분산형전력생산체계에 의하여 생겨난 고조파함량(THD)을 제한하는 규정들이 제기되고 그것을 줄이기 위한 연구가 활발히 진행되고있다.

론문에서는 계통연결형역변환기에서 고조파보상기능을 가진 PR조절기를 설계하고 TMS320F28335에 기초하여 300kVA계통연결 및 독립형역변환기의 전류조절기를 수차적으로 실현하기 위한 방법을 제안하였다.

### 1. 고조파보상기능을 가진 PR조절기의 설계

일반적으로 계통연결형태양빛발전체계에서 국가전력망에 넣어주는 출구전류의 THD 함량을 줄이기 위해서는 전류조절기를 합리적으로 설계하는것이 기본문제로 나서고있다.

이것을 해결하기 위한 방식들로는 현재 리력전류조종방식, 3각파비교조종방식, 예측전류조종방식, 반복조종방식, 비례적분조종방식, 비례공진조종방식 등과 같은 각이한 방식의 조절기들이 응용되고있다.

비례공진(PR: Proportional Resonant)조절기는 특정한 주파수에서만 증폭특성을 가지고 다른 주파수대역은 전혀 증폭하지 않기때문에 THD를 최소로 줄이면서 국가전력망에 시누스로 변하는 전류를 넣어줄수 있다.

론문에서는 3차, 5차, 7차배주파수성분들을 선택적으로 보상하는 PR조절기를 설계하여 출구전류의 고조파특성을 훨씬 개선하였다.

고조파보상기능을 가진 PR조절기를 보상기로 리용할 때 출구전류조종을 위한 체계구성도는 그림 1과 같다.

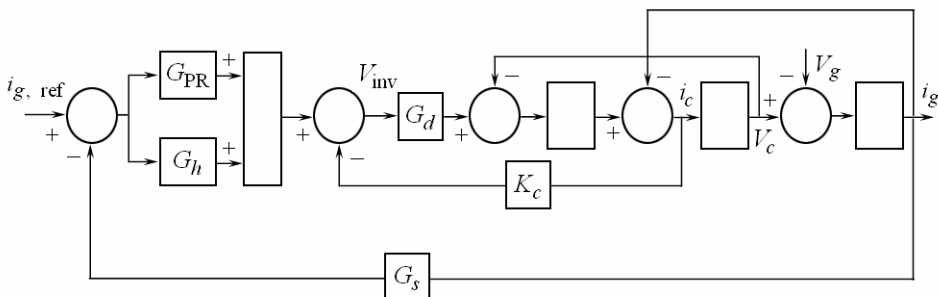


그림 1. 출구전류조종을 위한 체계구성도

그림 1로부터 체계의 열린고리전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = (G_{PR}(s) + G_h(s)) \cdot K_{pwm} \cdot G_d(s) \cdot G_f(s) \quad (1)$$

따라서 닫힌고리전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{(G_{PR}(s) + G_h(s))K_{pwm}G_d(s)G_f(s)}{1 + (G_{PR}(s) + G_h(s))K_{pwm}G_d(s)G_f(s)G_s(s)} \quad (2)$$

여기서  $G_f(s)$ 는 가상저항을 리용한 능동감쇠를 실현한 경우 LCL러파기전달함수,  $G_d(s)$ 는 역변환기 한주기 지연 전달함수,  $G_s(s)$ 는 역변환기 출구전류수감 전달함수,  $G_{PR}(s) + G_h(s)$ 는 고조파보상기능을 가진 PR조절기이다.

PR최량화설계결구들은 체계의 요소들을 수자적으로 모형화한데 기초하여 MATLAB의 SISO TOOL을 리용하여 결정하였다. 그리고  $K_i$ 는 교류주파수  $\omega_0$ 에서 정적오차가 최소로 되도록 설계하고 비례증폭도  $K_p$ 는 빠른 과도응답특성을 가지도록 설정하였다.

그림 2의 ㄱ)에 체계의 극점들과 영점들을, ㄴ)와 ㄷ)에 보데선도를 보여주었는데 여기서 해당한 정수들을 변화시키면서 극점들이 왼쪽반평면에 놓이도록 하여 체계가 안정한 체계가 되도록 한다.

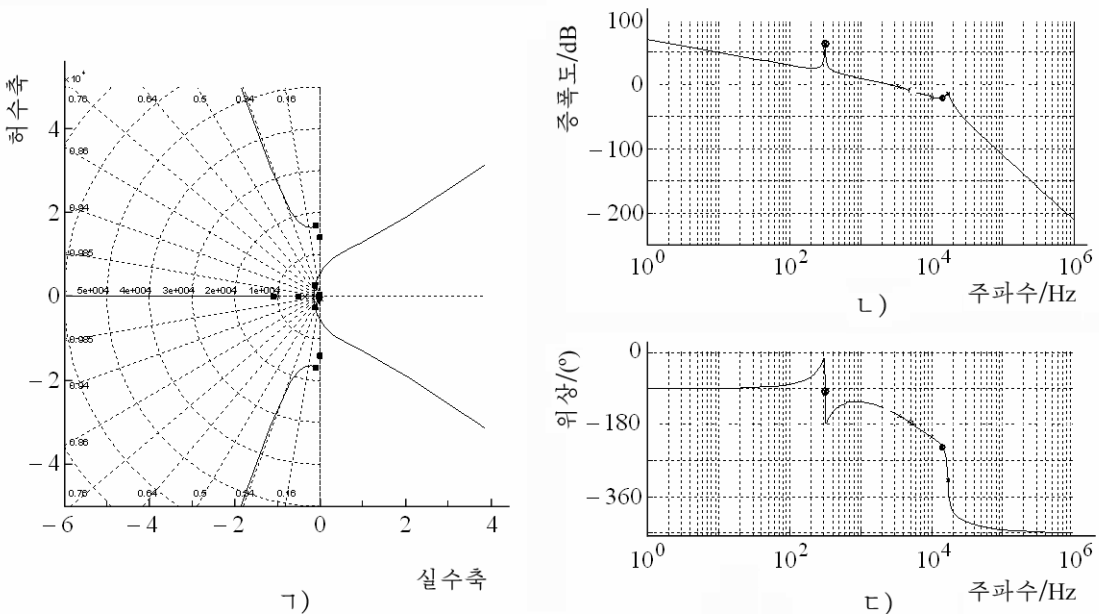


그림 2. 체계의 뿌리자리길선도(ㄱ)와 보데선도(ㄴ, ㄷ))

먼저 안정여유도와 동적성능을 반영하여 비례항을 결정하고 이에 기초하여 공진항을 결정하는데 중요한것은 PR조절기의 공진주파수가 체계의 진폭교차주파수보다 작아야 하며 체계의 위상여유도에는 영향을 주지 말아야 하고 증폭도  $K_p$ 가 클수록 공진주파수근방에서의 체계증폭도를 높여야 한다.

그림 2로부터 알수 있는바와 같이 체계의 진폭교차주파수 372Hz는 5kHz의 절환주파수보다 훨씬 작고 LCL러파기의 2.25kHz공진주파수보다 작으며 진폭여유도는 11.3dB, 위상여유도는 37.5°로서 체계는 비교적 안정하다고 볼수 있다.

한편 3, 5, 7차고조파보상기능을 가진 PR조절기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{PR3} = K_{r3} \frac{2\omega_{c3}s}{s^2 + 2\omega_{c3}s + (3\omega_0)^2} \quad (3)$$

$$G_{PR5} = K_{r5} \frac{2\omega_{c5}s}{s^2 + 2\omega_{c5}s + (5\omega_0)^2} \quad (4)$$

$$G_{PR7} = K_{r7} \frac{2\omega_{c7}s}{s^2 + 2\omega_{c7}s + (7\omega_0)^2} \quad (5)$$

3, 5, 7차고조파를 보상하였을 때 그림 3에서 보는바와 같이 체계의 진폭교차주파수는 529Hz이고 위상교차주파수는 1 240Hz이다. 또한 진폭여유도는 9.6dB이고 위상여유도는 46.3°로서 설계한 체계는 로바스트성이 강한 안정한 체계로 되었다.

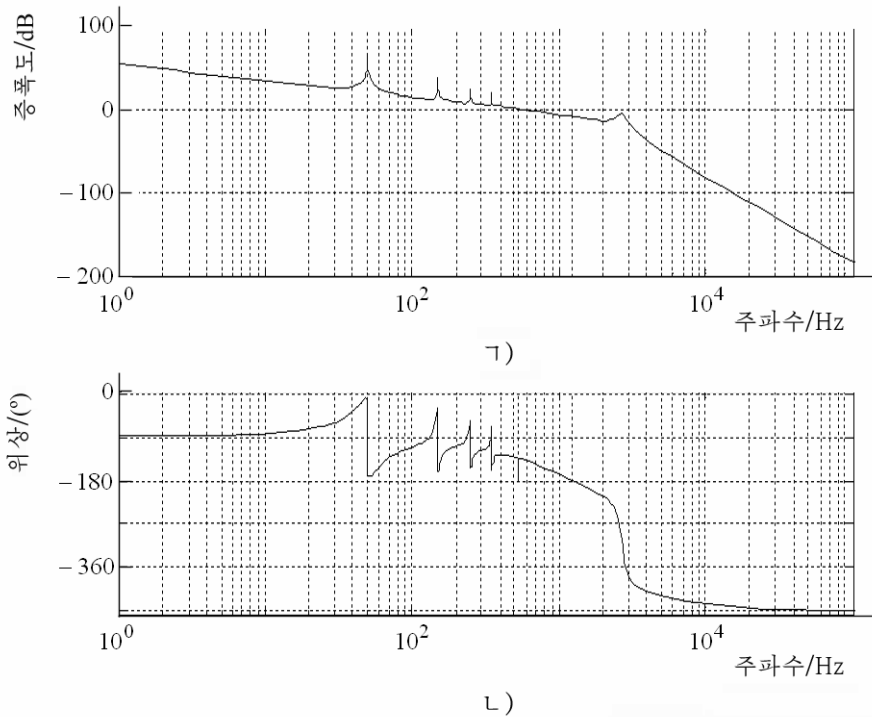


그림 3. 3, 5, 7차고조파를 보상하는 경우 체계의 보데선도(㉠, ㉡)

이에 기초하여 설계한 고조파보상기능을 가진 PR조절기를 DSP에서 프로그램적으로 실현하기 위하여 리산화를 다음과 같이 진행한다.

우선 PR조절기의 전달함수

$$G_{PR} = K_p + 2K_r \frac{w_c s}{s^2 + 2w_c s + w_0^2} \quad (6)$$

에서 공진항에 관한 전달함수를 다음과 같이 3개 부분으로 가른다.

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} = \frac{1}{s} \left( 1 - \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} - \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \right) \quad (7)$$

식 (7)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$y(s) = \frac{1}{s}[u(s) - v_1(s) - v_2(s)] \quad (8)$$

여기서

$$v_1(s) = 2\omega_c y(s)$$

$$v_2(s) = \frac{1}{s}\omega_0^2 y(s)$$

이다.

따라서 PR조절기는 그림 4와 같이 변화된다.

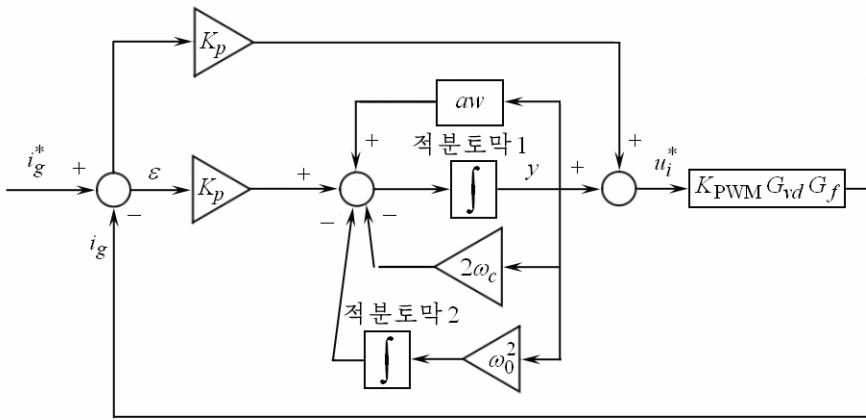


그림 4. 변화된 PR조절기

다음 시간지연의 영향을 없애기 위하여 그림 4의 적분토막 1에 대하여 오일러앞섬변환을, 적분토막 2에 대하여서는 오일러뒤섬변환을 다음과 같이 적용하여 쌍선형변환을 적용할 때보다 공진주파수에서의 편차를 작게 하였다.

$$\frac{1}{s} = T_s \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (9)$$

$$\frac{1}{s} = T_s \frac{1}{1 - z^{-1}} \quad (10)$$

따라서 제안한 방법으로 PR조절기를 리산화하면 다음과 같다.

$$\begin{cases} y_k = y_{k-1} + 2T_s K_R \omega_c \varepsilon_{k-1} - T_s (v_{1, k-1} + v_{2, k-1}) \\ U_{i, k}^* = K_p \varepsilon_k + y_k \\ v_{1, k} = 2\omega_c y_k, \quad v_{2, k} = v_{2, k-1} + T_s \omega_0^2 y(k) \\ \varepsilon_{k-1} = \varepsilon_k \\ y_{k-1} = y_k \\ v_{1, k-1} = v_{1, k}, \quad v_{2, k-1} = v_{2, k} \end{cases} \quad (11)$$

고조파보상을 위한 조절기의 수자적실현방법도 이와 유사하며 다만 기본파각주파수

대신에 고조파의 각주파수를 잡아넣으면 된다.

또한 비례조종은 기본파에 대하여 적용하였으므로 고조파에 대하여서는 따로 비례조종을 하지 않는다.

## 2. 실험 및 결과분석

300kVA계통련결 및 독립형역변환기의 주회로특성값은 다음과 같다.(표 1)

표 1. 계통련결형역변환기의 주회로특성값

직류입구전압	650V
계통전압	3상 275~410V
계통주파수	40~65Hz
출력	230kW
절환주파수	5kHz
러파유도도	0.3mH
러파콘덴사	80 $\mu$ F
계통련결유도도	0.08mH

계통련결형역변환기의 주회로특성값에 기초하여 PR조절기의 정수들을

$$K_p = 0.00317, K_{r1} = 0.504$$

로, 고조파보상에 관한 조절기의 정수들을 표 2와 같이 정하였다.

표 2. 고조파보상에 관한 조절기의 정수

차수	주파수/Hz	$\omega_C / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$K_r$
3	150	0.5	0.0723
5	250	1.25	0.026
7	350	2.7	0.107

역변환기출구전류의 THD분석은 전력종합분석기(《Power Analyzer》)로 하였다.

이 장치는 3상전압과 전류, 력률, 위상차, 고조파성분함량, 유효전력과 무효전력 등을 측정한다.

3, 5, 7차고조파보상을 진행한 경우 역변환기의 A상에 대한 출구전압과 전류파형을 그림 5에, 역변환기출구전류의 THD함량을 그림 6에 보여주었다.

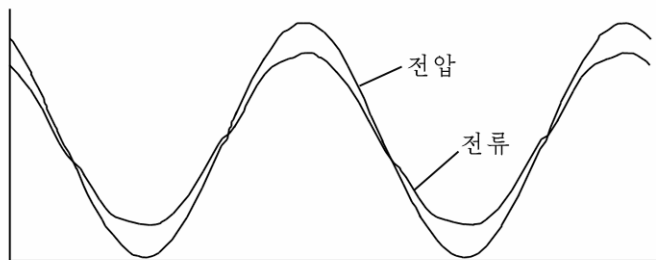


그림 5. 3, 5, 7차고조파보상을 진행한 경우 역변환기출구(A상)전압, 전류파형

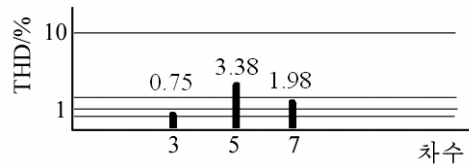


그림 6. 3, 5, 7차고조파보상을 진행한 경우 역변환기출구전류의 THD함량

계통전압이 203V이고 역변환기출구전류가 55A일 때 THD는 5.2%이다.

그림 6에서는 3, 5, 7차고조파성분에 대하여서만 고찰하였는데 이때 THD는 4%이다.

300kVA계통연결형역변환기는 8h부터 18h까지 동작한다. 하루 역변환기가 동작하는 동안 계통전압이 변화되는 조건에서 A상출구전류와 전류THD, 역변환기3상출력을 표 3에 보여주었다.

표 3. 하루 역변환기가 동작하는 동안 출구특성분석

동작시간/h	계통전압/V	A상출구전류/A	THD/%	역변환기 총 출력/kW	력률
8	205	69.1	5.7	42.5	0.99
9	198	84.8	4.8	50.4	0.991
10	197	128.3	3.6	76.2	0.992
11	207	176.4	3.1	109.6	0.993
12	210	240.3	2.7	151.4	0.999
13	201	365.5	2.6	220.3	0.999
14	203	286	2.7	173.9	0.999
15	206	95.2	4.2	59.2	0.992
16	204	61.7	6.3	37.8	0.991
17	197	44.1	13.6	25.9	0.985

표 3에서 알수 있는바와 같이 13h경에 역변환기는 최대출력에서 동작하였으며 각이한 계통전압에서도 THD가 매우 낮은 전류를 전력망에 넣어주며 계통전압과 출구전류의 위상이 거의 일치하여 력률이 거의 1이라는것을 알수 있다.

## 맺 는 말

고조파보상기능을 가진 PR조절기설계의 한가지 방법을 제안하고 계통연결형역변환기에 적용하여 그 효과성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] Daniel Zammit; IEEE Trans. Power. Electron., 3, 18, 2017.
- [2] Nayan Kumar; IEEE Trans. Power. Electron., 78, 165, 2016.

주제109(2020)년 2월 5일 원고접수

## **The Method for Improving the Characteristics of Output Current of Grid-Connected Inverter Using Harmonic Compensation**

*Kim Chol Jun, Han Myong Song*

We proposed a method for design of PR controller with harmonics compensation and proved the efficiency by applying it to grid –connected inverter.

Keywords: grid-connected inverter, PR controller, harmonics compensation