

가변이득을 가지는 디지털제어 단상 역률보상회로

백주원*, 신병철*, 정창용*, 이영운*, 유동욱*, 김홍근**
 *한국전기연구원 전력전자연구그룹, **경북대학교 전자전기공학부

Single-Phase Power Factor Correction(PFC) Converter Using the Variable gain

J. W. Baek, B. C. Shin, C. Y. Jeong, Y. W. Lee, D. W. Yoo, H G. Kim
 Power Electronics Group, KERI, Electrical Eng., Kyungpook Univ.

Abstract - This paper presents the digital controller using variable gain for single-phase power factor correction(PFC) converter. Generally, the gain of inner current control loop in single-stage PFC converter has a constant magnitude. This is why input current is distorted under low input voltage. In particular, a digital controller has more time delay than an analog controller which degrades characteristics of control loop. So, it causes the problem that the gain of current control loop isn't increased enough. In addition, the oscillation happens in the peak value of the input voltage open loop PFC system gain changes according to ac input voltage. These aspects make the design of the digital PFC controller difficult.

In this paper, the improved digital control method for single-phase power factor converter is presented. The variable gain according to input voltage and input current help to improve current shape. The 800W converter is manufactured to verify the proposed control method.

1. 서 론

모든 장비에 대한 입력 역률과 고조파에 대한 규제가 점차 강화되고 있는 현실에 따라 역률보상회로에 대한 개발과 연구가 계속 이뤄지고 있으며 여러 문헌에서 연구 결과들이 소개되어 왔다. 입력역률에 대한 각종 규제들로서 IEC555-2, IEEE 519, IEEE1000-3-2와 같은 국제규제법규가 고조파에 대한 기준을 정하고 있으며 입력전류의 각 주파수에 해당되는 고조파에 대해 허용 가능한 최대 고조파전류의 한계치를 정하고 있고 이에 대한 강제 규정이 강화되고 있다.

이러한 추세를 반영하여 최근 산업계에서는 가전기에서 서부터 역률보상회로의 개발과 탑재를 시작하고 있으며 점차 중용량급 이상의 산업용 기기로 확산되어가고 있다.

한편, 지금까지 역률보상회로들은 주로 입력역률 보상 장치의 전용소자들(Microlinear ML4812, Unitrode UC3854, Motorola MC34261 등)을 사용하여 전원의 제어회로를 개발하였다. 그렇지만 복잡한 제어 알고리즘을 구현할 수 있고 규격화된 하드웨어 설계가 가능하게 한 장점을 가지는 경제적인 단일소자형 디지털 제어 소자의 출현으로 디지털 제어회로를 이용한 역률보상회로의 연구가 이뤄지기 시작하고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

본 논문에서는 가변이득을 가지는 디지털 단상 역률보상회로를 제안한다. 역률보상회로는 크게 두가지의 제어루프로 구성되며 출력전압을 제어하는 기능을 하는 전압제어루프와 입력전류의 제어를 하는 전류제어루프로 나뉘어진다. 전류제어루프의 구성은 최대 전류모드 제어(ACIC)⁽³⁾, 평균 전류모드 제어(ACIC)^{(4),(5),(6),(7)} 또는 가변 히스테리시스(V-H) 제어^{(7),(8)}를 적용할 수 있으나 본 논문에서는 ACIC와 V-H 제어기법의 단점을 극복할 수 있는 ACIC를 적용하여 전류제어루프에서 가변 이득을 가지는 단상 PFC 디지털 제어를 적용한 고역률 승압용 컨버터를 구성하였다.

특히, 기존의 디지털제어 방법들과 달리 간단한 보상요소 즉, 전류루프에 일정한 가변이득을 주므로 보다 우수한 입력전류 및 역률을 얻을 수 있다

제안하는 제어기법의 타당성을 검증하기 위해 800W의 단상 역률 보상회로를 구성하여 이의 동작을 검증하였다.

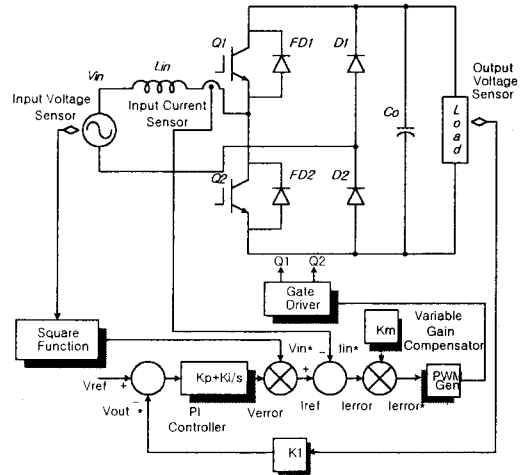


그림 1 가변 이득을 가지는 디지털 제어 역률보상회로

2. 제어회로의 구성

2.1 디지털제어 역률보상회로

승압용 컨버터는 식(1)과 식(2)와 같은 각각 출력전압 V_{out} 와 입력전류 i_L 과 같이 두 가지 상태변수로 구성되어 있다[9].

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L_{in}} V_{in} - \frac{1-k}{L_{in}} V_{out} \quad (1)$$

$$\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{1-k}{C_o} i_L - \frac{V_{out}}{RC_o} \quad (2)$$

여기서, 상수 k 는 승압용 스위치의 상태 ($k=0$ 는 스위치-오프, $k=1$ 는 스위치-온)를 나타내는 논리변수이다. 만약 PFC가 적절히 수행된다면, 입력전류 $i_{in}(t)$ 는 사인 파형이 되고 입력전압과 동위상이 된다. 그렇지만 실제 입력전압이 거의 영인 구간에서는 충분한 전류상승을 얻기 위해서 온 구간이 상당히 넓어져야 하며 아날로그 제어기에서는 충분한 전류이득을 가지기 때문에 바라는 온 구간이 얻어지므로 디지털 제어회로에 비해 전류왜형 문제가 그다지 심하지 않다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 기존의 디지털 역률보상회로 제어기^{(8),(9)} 다이어그램을 보여주고 있다.

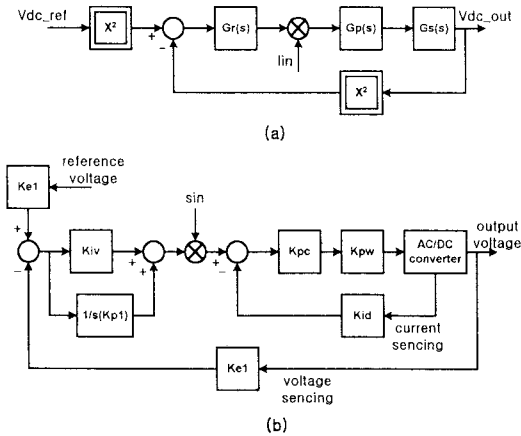


그림 2 기존의 디지털 PFC 제어기

이러한 제어기에 의한 역률보상회로의 구현은 많은 문제점들을 가지고 있다. 일반적으로 단상 PFC에서 내부 전류제어루프의 이득은 일정한 크기를 가지는데 이로 인하여 그림 4(a)의 입력전압이 낮은 구간 ($T_1 \sim T_4$)에서의 전류제어가 원활하지 않아 역률이 나빠진다. 특히 디지털 제어기에서는 아날로그 제어기에 비해 제어 시간 지연이 나타나게 되는데 이것은 전체 PFC회로의 페이저 마진(phase margin)을 저하시켜 전류루프의 이득을 충분히 높게 할 수 없다. 이러한 이유로 낮은 전압에서 전류 파형은 아날로그 제어기의 전류 파형보다 제어하기 어렵다. 또 전류기준치가 AC이기 때문에 시스템의 이득이 바뀌고 제어기 이득을 크게 했을 때는 전압의 침두 부분에서는 오실레이션이 발생하는 등 디지털 제어기를 구성하는데 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 시지연 부분을 보상하는 요소를 추가하여 보상하거나 데이터 샘플링을 빠르게 하여 이를 최소화하는 방법들이 현재까지 소개되어 왔다.

2.2 제안하는 가변이득의 제어회로

본 논문에서 제안된 제어기는 그림 3과 같이 디지털의 장점을 충분히 살려 입력전압에 따라 전류제어기의 이득을 가변시켜 제어기의 성능을 극대화하였다. 전압제어기는 간단한 PI 제어기로 구성하였으며 전체 제어회로는 입력전류의 왜형을 보상하는 기능을 우선하므로 정상상태에서 출력전압을 추종할 수 있도록 간단히 구성하였다.

그림 4는 전류제어 루프에서 오차신호의 파형을 도시한 것이다. 그림 4(b)는 종래의 일반 제어기에서 얻어진 파형을 나타낸 것이며 그림 4(c), (d)는 제안하는

가변이득을 통해 얻어진 변형된 전류오차신호이다. 가변이득은 여러 가지 형태가 있을 수 있으며 본 논문에서는 우선, 세가지 형태의 가변이득을 이용하여 바라는 전류오차신호를 얻도록 하였다.

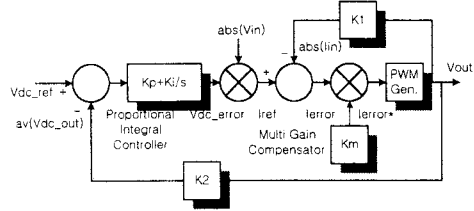


그림 3. 제안된 단상 역률보상 디지털 제어기

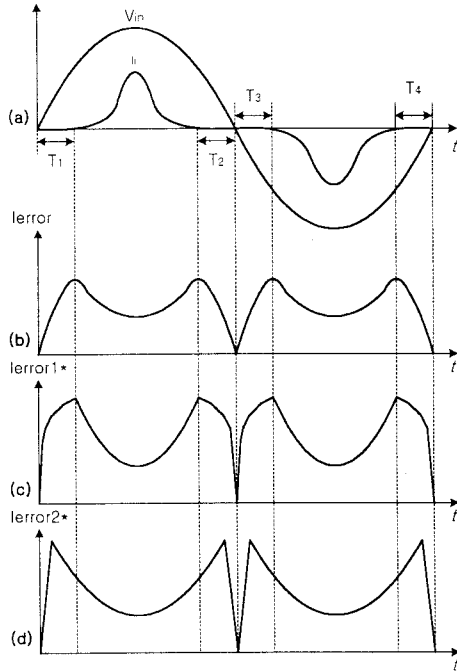


그림 4 단상 PFC 디지털 제어기 파형

- (a) 기존의 제어기를 이용한 입력전압과 전류파형
- (b) 기존의 제어기를 이용한 전류오차 신호
- (c), (d) 제안된 제어기를 이용한 전류오차 신호

먼저, 출력전압 오차는 출력커패시턴스 값이 충분하고 정상상태에서 안정화 된 것으로 볼 때 일정한 직류값을 가진다고 본다.

그림 4(b)의 전류오차신호 I_{error} 는 입력전압의 오차신호와 입력전압의 곱으로 얻은 기준신호와 피드백된 입력전류 신호의 차로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$i_{ref}(t) = \sqrt{2} V_i \sin(\omega t) * V_{error} \quad (3)$$

$$i_{error}(t) = i_{ref}(t) - i_L(t) \quad (4)$$

상기식의 전류오차로부터 적절한 가변이득을 곱해주므로 바라는 이득이 낮은 T_1, T_2 등과 같은 구간에 대해 충분한 이득보상효과를 얻을 수 있다. 먼저, 본 논문에서는 첫 번째로 식(5)과 같은 계단함수를 곱함으로서 식(6)의 전류오차신호를 얻었으며 그림 4(c)에 나타낸 형태를 가진다.

$$u_s(t) = A_0 u_s(0) + A_1 u_s(1) + A_2 u_s(2) + \dots + A_n u_s(n) \quad (5)$$

$$i_{error}^*(t) = u_s(t) \times i_{error}(t) \quad (6)$$

여기서, A는 이득비계수이다. 이 식을 적용한 개루프 이득은 일정하게 되어 AC 전류 기준치에 독립적으로 전류제어 능력을 극대화시키고자 하였다. 두 번째로 가변이득은 T1, T2 구간에서 최대의 이득을 가지면서 점차 전류의 첨두부분에서는 최소로 감소하도록 입력전압으로 다음식과 같이 가변시켰다.

$$i_{error2}^*(t) = \frac{i_{error}(t)}{|V_{in}(t)|^2} \quad (7)$$

마지막으로, 가변이득을 통해 영점에서 최대한의 이득을 가지면서 안정적인 전류보정효과가 일어나도록 입력전류를 역시, 가변이득의 구성요소로 다음 식과 같이 추가하였다.

$$i_{error2}^*(t) = k_1 \frac{i_{error}(t)}{|V_{in}(t)|^2} - k_2 i_t(t) \quad (8)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 보정상수이다. 상기 두가지 형태의 전류오차신호의 파형은 거의 유사하나 전류의 왜형이 발생하면 이를 피드백해서 보정하는 효과가 세 번째 보상기에서 보다 많이 나타나게 된다.

3. 실험결과

본 논문에서 제안한 보상이득 Km 을 갖는 단상 역률보상 디지털 제어기를 검증하기 위해 800W급 단상 역률보상 컨버터 시험기를 제작하였다. 시험기의 파라미터는 표 1과 같다. 계단함수를 이용한 가변이득은 이득의 변화 폭이 상대적으로 커기 때문에 전류이득이 커질 경우 불안정한 효과를 가져오며 이에 따라 전류왜형의 보정효과가 떨어지는 단점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 두 번째와 세 번째로 제안한 방식에 대해 시험을 한 뒤에 종래의 제어기를 사용한 결과와 비교하였다.

표 1 시스템 파라메타

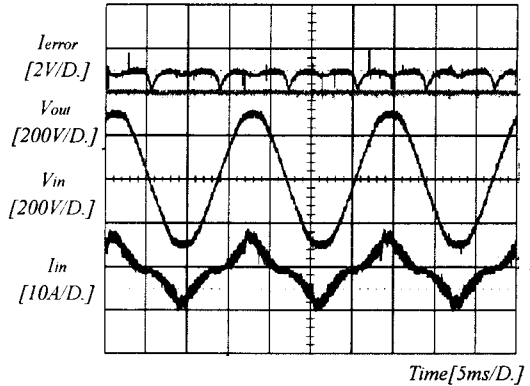
파라메타	값
입력전압	180Vac - 240Vac
스위칭 주파수	20kHz
입력인덕터	400uH
출력커패시터	1800uF
출력전압	380Vdc

다음 그림 5는 100%부하와 220V 입력전압에 대해 입력전압과 전류 그리고 출력전압과 전류오차신호의 파형을 나타낸 것이다.

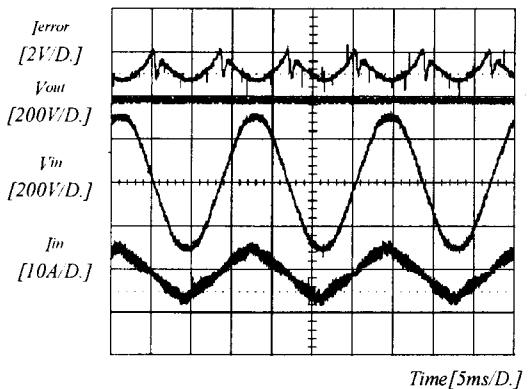
제한한 제어기를 사용한 방식이 보다 입력전류의 왜형 보정효과가 우수함을 알 수 있다. 특히, 입력전류를 고려한 가변이득 제어기는 입력전류의 왜형이 존재하는 구간에서의 전류보정효과가 보다 우수함을 알 수 있다. 입력전압 220V에서는 제안한 두 제어기의 차이가 거의 없으나 그림 6에서 나타낸 바와 같이 입력전압이 240V인 경우에 차이가 존재함을 알 수 있다.

그림 7은 전부하에서 무부하로 그리고 무부하에서 전부하로 부하조건을 바꿀 때, 제안한 제어기와 기존제어기의 동적 특성을 나타낸 것이다. 동일한 전압제어기에 대해 전류제어기가 다른 경우에 대해 부하조건을 바꿔서 영향을 살펴보았다.

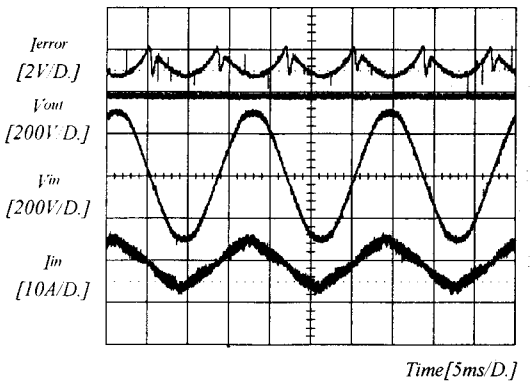
제한한 제어기들은 거의 차이가 없었으며 역시 기존의 일반 제어기와 비교할 때 동특성에서는 큰 차이가 나타나지 않았다. 그러므로 제안한 회로에 의한 추가적인 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

그림 5. 기존 제어기와 가변이득 $U_s(t)$ 을 사용한 단상 역률보상 컨버터의 출력파형

- (a) 기존 제어기를 사용할 때
- (b) 입력전압을 이용한 가변이득 제어기
- (c) 입력전압과 전류를 이용한 가변이득 제어기

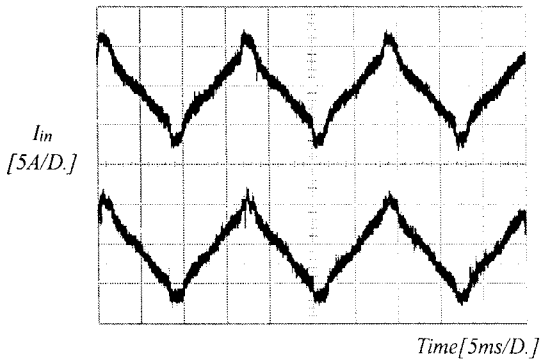
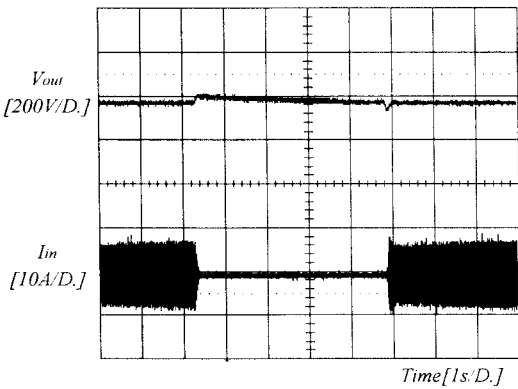
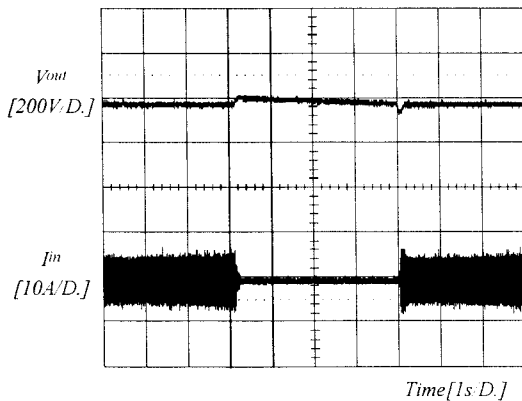


그림 6. 입력전압 240V에서의 입력전류 파형
 상 : 입력전압을 이용한 가변이득 제어기
 하 : 입력전압과 전류를 이용한 가변이득 제어기



(a)



(b)

그림 7. 전부하에서 무부하로 급변할 때와 무부하에서 전부하로 급변할 때의 출력전압 변동
 (a) 기존의 제어기
 (b) 제안한 가변이득을 이용한 제어기

4. 결 론

본 논문에서는 가변이득을 갖는 디지털 제어 역률보상 회로를 제안하였다. 종래의 아날로그 제어기에 비해 디지털 제어기는 복잡한 제어개념의 구현이 가능하며 각

소자의 비선형특성으로 인한 문제 역시 해소할 수 있었다. 특히, 지금까지 소개된 디지털 제어회로들이 연산에 따른 지연과 같은 문제를 해소하기 위해 복잡한 제어 알고리즘을 도입하였으나 본 논문에서는 입력전압과 전류에 따른 간단한 가변 이득으로 입력전류의 왜형을 충분히 보정할 수 있었다.

제안하는 방법은 구현이 용이하고 우수한 보상효과를 가지므로 향후 역률보상회로에 많은 적용이 가능하리라고 판단된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Minghua Fu and Qing Chen, "A DSP Based Controller for Power Factor Correction(PFC) in a Rectifier Circuit", IEEE APEC 2001, pp.144-149.
- [2] Stephane Bivian and Hua Jin, "Digital Control with Improved Performance for Boost Power Factor Correction Circuits", IEEE APEC 2001, pp.137-143.
- [3] C.Zhou and M.M. Jovanovic, "Design Trade-offs in Continuous Current-Mode Controlled Boost Power Factor Correction Circuits", High frequency Power Conversion Conference Record, 1992, pp.209-220.
- [4] C.Silva, "Power Factor Correction with the UC3854", Application Note, Unitrode Integrated Circuits.
- [5] W.Tang, F.C.Lee and R.B.Ridley, "Small-Signal Modeling of Average Current-Mode Control", IEEE Applied Power Electronics Conference Proceedings, 1992, pp747-755.
- [6] L.Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies", Unitrode Switching Regulated Power Supply Design Seminar Manual, SEM-700, 1990.
- [7] J.Ch. Le Bunetel and M. Machmoum, "Control of Boost Unity Power Factor Correction System", Proceedings of the 1999 IEEE 25th Annual Conference of The IEEE Industrial Electronics Society - Volume 1, 266-271.
- [8] Tognolini M. and Rufer A.-Ch., "A DSP based Control for a Symmetrical Three-Phase Two-Switch PFC-Power Supply for Variable Output Voltage", IEEE PESC 96, pp.1588-1594.
- [9] M.Chang, J.Lin and Y.Tzou, "DSP-based Fully Digital Control of a AC/DC Converter with a Nonlinear Digital Current Mode Control", IEEE PESC 96, pp.1702-1708.