

칼만필터를 이용한 3상 PFC AC/DC 컨버터의 센서리스 제어

박준성 · 권영안*

Sensorless Control of 3-phase PFC AC/DC Converter using Kalman Filter

Jun-Sung Park · Young-Ahn Kwon*

Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Korea

요 약

3상 PWM 컨버터는 입력 전류를 정현적으로 제어할 수 있어 입력 전류의 고조파 성분을 감소시킬 수 있고 입력 전압에 대하여 입력 전류의 위상을 제어할 수 있다. 본 논문은 3상 PWM 컨버터의 역률개선을 위하여 전원전압센서를 사용하지 않고 가상자속기반 벡터제어를 적용한 새로운 센서리스 제어방식을 연구하였다. 직류출력전압은 칼만 필터를 적용하여 추정된 가상자속에 의해 제어되며, 동기위상은 추정된 가상자속을 이용하여 위상을 얻는다. 제시한 PFC 알고리즘은 역률개선 및 가변영역에서 직류출력전압, 부하변동에서 직류출력전압을 정밀하게 제어할 수 있는 우수성을 가진다. 본 논문에서 제안한 가상자속추정 알고리즘을 적용한 칼만 필터 성능은 실험과 시뮬레이션을 통해서 검증하였다.

ABSTRACT

This paper investigates a new sensorless control applying a virtual flux oriented vector control without the line voltage sensor for the power factor correction of 3 phase PWM converter. The DC output voltage is controlled by applying the kalman filter algorithm for the virtual flux estimation and the synchronous phase is obtained by using the estimated virtual flux equation based on kalman filter. This method is used to reduce the calculation time of the system and obtain a stable control that the input current including the harmonics and the noise is improved. The proposed system implement PFC algorithm in the variable region of DC output voltage. It can obtain the unity power factor, and can precisely control the DC output voltage in the load variation and in the variable voltage range. The performance of the proposed algorithm is verified through simulation and experiment.

키워드 : 가상자속추정, 칼만 필터, 역률개선, 센서리스제어, 3상 컨버터

Key word : Virtual flux estimation, Kalman filter, Power factor correction, Sensorless control, 3 phase converter

Received 04 January 2016, Revised 14 January 2016, Accepted 15 April 2016

* Corresponding Author Young-Ahn Kwon(E-mail:yakwon@pusan.ac.kr, Tel:+82-51-510-2372)

Department of Electrical Engineering, Pusan University, Busan 46241, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.5.998>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

최근 산업현장에서 여러 종류의 전력변환장치가 널리 사용되고 있다. 하지만 하드웨어 노이즈 및 고조파에 의한 시스템 불안정이 대두되고 있다. 이에 고효율, 고성능 등의 요구사항을 만족하기 위하여 다양한 하드웨어 토폴로지와 제어기법을 활용하고 있다. 일반적으로 전력변환장치의 하드웨어 구성을 줄이면서 전압, 전류 스트레스를 분산시키는 VSC-브리지 양방향 승압형 컨버터를 많이 사용하고 있다. 그리고 다양한 제어기법을 활용하여 컨버터의 효율과 저차 고조파제거, 양질의 출력을 얻을 수 있다[1-5].

대부분의 가상자속추정제어는 전압을 로우패스, 밴드패스 필터를 시적분하여 변환된 값으로 제어를 한다 [5]. 그리고 VF기반으로 스위칭 전압벡터를 이용한 직접전력제어와 자속가상관측기를 이용한 정상상태 오차 보상 제어를 하였다[6,7].

기존 논문에서 제시한 가상자속추정방식들은 별도의 필터를 사용함으로써 추가적인 연산이 필요하며, 필터에 의한 시간지연으로 인해 시스템의 응답성이 떨어지게 된다. 또한 시스템 초기상태일 때 부정확한 가상자속을 추정할 수 있다[8].

본 논문에서는 입력전류 노이즈에 강인한 칼만 필터를 사용한 제어방식을 제안하였다. 자속 연산단계에서 별도의 필터를 사용하지 않는다. 전체 시스템의 연산시간을 줄이면서 입력전류에 포함된 고조파 및 노이즈성분을 제거한다. 입력전류, 직류출력전압, 가상자속의 데이터만을 사용하여 직류출력전압을 보정하고 리플을 감소시키며, 제안된 가상자속을 이용한 제어방식은 시뮬레이션 및 실험의 통해서 검증하였다.

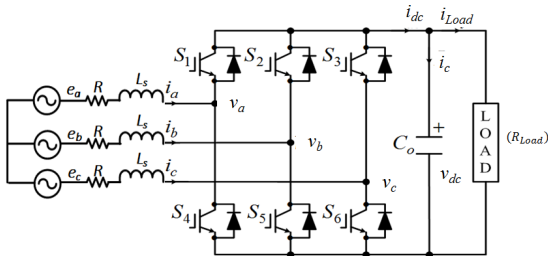


Fig. 1 3-phase AC/DC converter

II. 3상 AC/DC 컨버터의 수학적 모델링

그림 1은 본 논문에서 사용하는 3상 AC/DC 컨버터 회로이다. 컨버터회로의 구성은 교류 입력 측 승압용 리액터 L_s , 전력소자, 전압맥동 감소용 커패시터 C_o , 부하로 구성된다.

3상 AC/DC 컨버터전압방정식은 식(1)처럼 표현할 수 있다.

$$e_{abc} = Ri_{abc} + L_s \frac{di_{abc}}{dt} + v_{abc} \quad (1)$$

여기서 e_{abc} 는 전원전압이며, v_{abc} 는 컨버터 입력전압, i_{abc} 는 상전류이다. 2상 정직좌표계인 $\alpha s - \beta s$ 축의 전압방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_{\alpha s} = Ri_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} + v_{\alpha s} \quad (2)$$

$$e_{\beta s} = Ri_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + v_{\beta s} \quad (3)$$

정직좌표계 전압방정식을 $de - qe$ 축 동기좌표계로 변환한 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e_{de} = Ri_{de} + L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega_c L_s i_{qe} + v_{de} \quad (4)$$

$$e_{qe} = Ri_{qe} + L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega_c L_s i_{de} + v_{qe} \quad (5)$$

E_m 는 전원 전압의 최대치이며, 전원전압이 3상 정현파 전압의 전체 조건에서 변환된 동기좌표계 전압방정식 식(4)과 식(5)에 대입하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$0 = Ri_{de} + L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega_c L_s i_{qe} + v_{de} \quad (6)$$

$$E_m = Ri_{qe} + L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega_c L_s i_{de} + v_{qe} \quad (7)$$

여기서, ω_c 는 동기각속도이며, de 축을 0으로 가정한다면 무효성분을 상쇄시킬 수 있다.

III. 칼만필터를 이용한 센서리스 제어

3.1. 가상자속 상태방정식

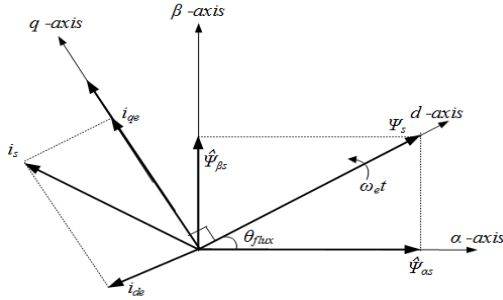


Fig. 2 Vector diagram of virtual flux reference

그림 2는 정상상태 시 가상자속벡터 기준으로 α - β 축은 정지좌표계이며, d - q 축은 동기축이다. 전압방정식에서 $R=0$ 으로 하고, 전원전압과 가상자속의 관계로 재정립하면 식(8)처럼 나타낼 수 있다[6,7].

$$\bar{e}_s = Ri_s + \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} \quad (8)$$

$$\int \bar{e}_s dt = - \int E_m \sin \omega_e t dt + j \int E_m \cos \omega_e t dt \quad (9)$$

$$\bar{\Psi}_s = \hat{\Psi}_m \cos \omega_e t + j \hat{\Psi}_m \sin \omega_e t \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\Psi}_s}{dt} &= \frac{d\hat{\Psi}_m}{dt} \cos \omega_e t + j \frac{d\hat{\Psi}_m}{dt} \sin \omega_e t \\ &= \frac{d\hat{\Psi}_{\alpha s}}{dt} + j \frac{d\hat{\Psi}_{\beta s}}{dt} + j \omega_e (\hat{\Psi}_{\alpha s} + j \hat{\Psi}_{\beta s}) \end{aligned} \quad (11)$$

단, $\bar{e}_s = e_{\alpha s} + j e_{\beta s}$, $\bar{\Psi}_s = \hat{\Psi}_{\alpha s} + j \hat{\Psi}_{\beta s}$, $\hat{\Psi}_m = \frac{E_m}{\omega_e}$: 가상자속크기

위의 수식에서 추정된 가상자속을 미분하게 되면 식(12)처럼 표현할 수 있다.

$$[\dot{\hat{\Psi}}_{\alpha s} \ \dot{\hat{\Psi}}_{\beta s}] = [-\omega_e \hat{\Psi}_{\beta s} \ \omega_e \hat{\Psi}_{\alpha s}] \quad (12)$$

가상자속은 삼각함수를 이용하여 표현가능하며, θ_{flux} 동기위상은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin \theta_{flux} = \frac{\hat{\Psi}_{\beta s}}{\sqrt{\hat{\Psi}_{\alpha s}^2 + \hat{\Psi}_{\beta s}^2}}, \quad \cos \theta_{flux} = \frac{\hat{\Psi}_{\alpha s}}{\sqrt{\hat{\Psi}_{\alpha s}^2 + \hat{\Psi}_{\beta s}^2}} \quad (13)$$

$$\theta_{flux} = \tan^{-1} \left(\frac{\hat{\Psi}_{\beta s}}{\hat{\Psi}_{\alpha s}} \right) \quad (14)$$

3.2. 칼만 필터 알고리즘

식(15)-식(16)은 칼만 필터 수식을 표현하였다[9,10].

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (15)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (16)$$

단, $\mathbf{x}(k)$: 상태변수 $\mathbf{u}(k)$: 사용자 입력변수 $\mathbf{z}(k)$: 측정값
 \mathbf{A} : 상태전이행렬 $\mathbf{w}(k)$: 시스템 외란 \mathbf{H} : 변환행렬
 $\mathbf{v}(k)$: 측정노이즈 벡터

가상자속 방정식을 적용하여 상태변수 $\mathbf{x}(k)$ 와 사용자 입력변수 $\mathbf{u}(k)$ 와 측정값 $\mathbf{z}(k)$ 는 아래와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k) &= [\hat{i}_{\alpha s} \ \hat{i}_{\beta s} \ \hat{\Psi}_{\alpha s} \ \hat{\Psi}_{\beta s}]' & \mathbf{u}(k) &= [v_{\alpha s} \ v_{\beta s}]' \\ \mathbf{z}(k) &= [\hat{i}_{\alpha s} \ \hat{i}_{\beta s}]' \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_s} & 0 & 0 & -\frac{\omega_e}{L_s} \\ 0 & -\frac{R}{L_s} - \frac{\omega_e}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\omega_e \\ 0 & 0 & \omega_e & 0 \end{bmatrix} & \mathbf{B} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{H} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

칼만 필터는 2단계로 예측단계와 추정단계로 구성하며, $\mathbf{x}_k|_{k-1}$ 추정변수이다. 식(19)은 예측단계를 구성하는 식이다.

$$\mathbf{x}_k|_{k-1} = \mathbf{x}_{k-1}|_{k-1} + [\mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1}|_{k-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{k-1}]T_c \quad (19)$$

$$\mathbf{P}_k|_{k-1} = \mathbf{P}_{k-1}|_{k-1} + (\mathbf{A}\mathbf{P}_{k-1}|_{k-1} + \mathbf{P}_{k-1}|_{k-1}\mathbf{A}')T_c + \mathbf{Q}$$

추정단계는 식(20),식(21)이며, 칼만 필터 이득 \mathbf{K}_k 은 식(22)처럼 나타낸다.

$$\mathbf{x}_k|_k = \mathbf{x}_k|_{k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{z}_k - \mathbf{H}\mathbf{x}_k|_{k-1}) \quad (20)$$

$$\mathbf{P}_k|_k = \mathbf{P}_k|_{k-1} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}\mathbf{P}_k|_{k-1} \quad (21)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k|_{k-1}\mathbf{H}'(\mathbf{H}\mathbf{P}_k|_{k-1}\mathbf{H}' + \mathbf{R})^{-1} \quad (22)$$

IV. 시뮬레이션

3상 PFC AC/DC 컨버터에서 제안한 칼만필터를 이용한 센서리스 제어를 검증하기 위하여 그림 3처럼 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 컨버터 사양은 입력전압 3상 250V, 직류출력전압은 500V이며, 인덕터 1mH, 직류커패시터 5500uF, 부하는 저항 100Ω을 사용하였다.

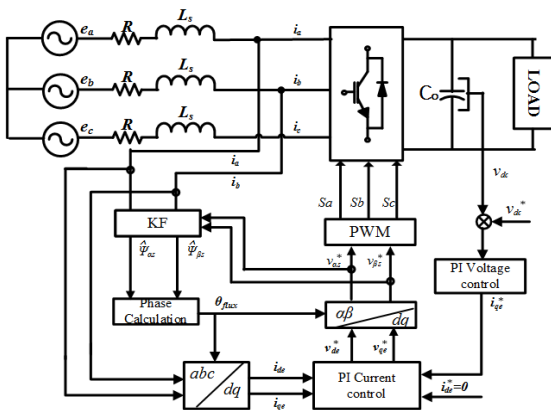


Fig. 3 Block diagram of the overall system

시뮬레이션에서 잡음 공분산 Q와 측정 잡음 공분산 R은 반복적인 실험을 통해서 다음과 같이 가정한다.

$$P = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} R = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix} Q = \begin{bmatrix} 0.1^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1^{-3} \end{bmatrix}$$

그림 4는 지령 직류출력전압을 500[V]로 고정한 상태에서 칼만 필터를 이용한 3상 PFC AC/DC 컨버터의 센서리스 제어 시뮬레이션 결과이다. 시지연이 발생하는 상전압적분을 사용하지 않고 추정된 가상자속을 사용하여 동기위상을 연산하였다. 이론을 기반으로 한 가상자속방정식을 시뮬레이션에 적용하여 $\hat{e}_{\alpha s}, \hat{e}_{\beta s}$ 상 전압과 $\hat{\psi}_{\alpha s}, \hat{\psi}_{\beta s}$ 가상자속추정은 90. 위상차를 나타낸다.

그림 5는 무 부하상태에서 직류출력전압을 500V로 승압 후 임의의 시간에 부하 100%인가했을 때 직류출력전압을 나타내고 있다. 그림 6-9는 초기 구동 후 정상 상태에서 직류출력전압을 변동 시 컨버터가 동작하는지

검증하는 시뮬레이션이다. 승압동작은 400V→450V, 450V→500V를 단계적으로 직류출력전압을 상승시킨 후, 승압상태에서 500V→450V, 450V→400V로 강압동작에서 입력전압, 전류의 PFC 시뮬레이션이다.

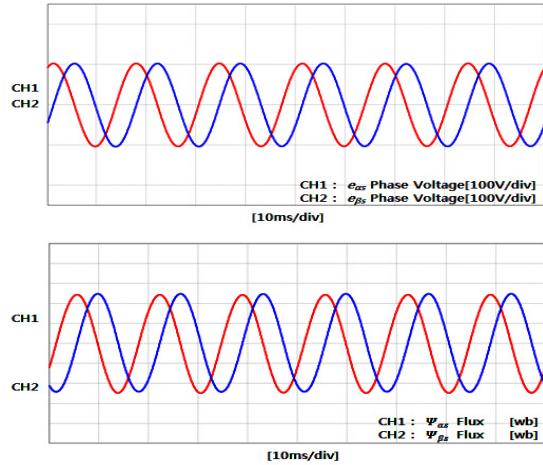


Fig. 4 Simulation waveform of $\hat{e}_{\alpha s}, \hat{e}_{\beta s}$ phase voltage and estimated $\hat{\psi}_{\alpha s}, \hat{\psi}_{\beta s}$ flux

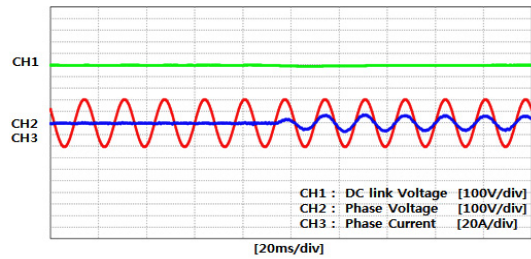


Fig. 5 PFC simulation waveform in the case of the boost operation(500[V], No load → load 100[%])

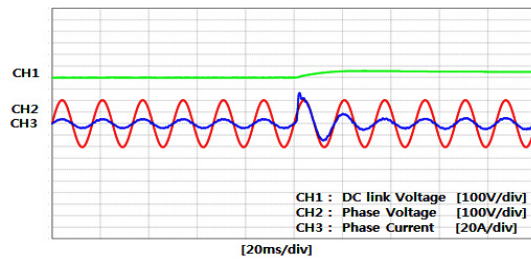


Fig. 6 PFC simulation waveform in the DC link Voltage Variation(400[V] → 450[V], load 100[%])

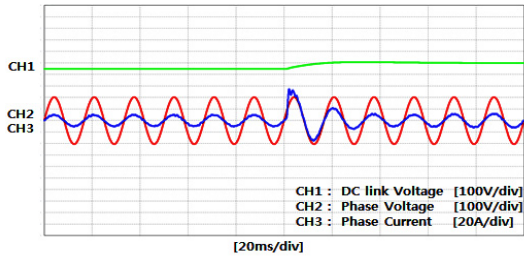


Fig. 7 PFC simulation waveform in the DC link Voltage Variation(450[V] → 500[V], load 100[%])

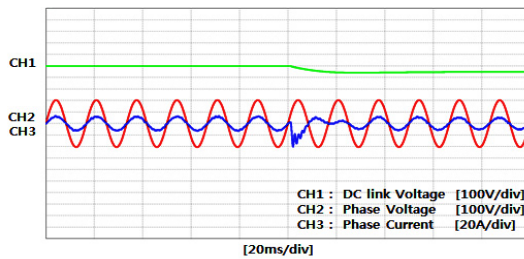


Fig. 8 PFC simulation waveform in the DC link Voltage Variation(500[V] → 450[V], load 100[%])

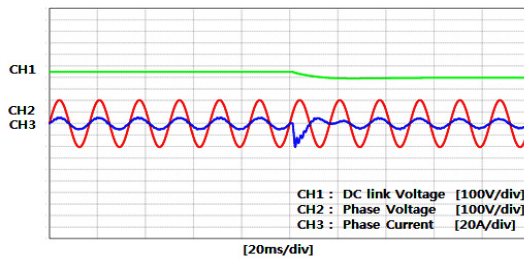


Fig. 9 PFC simulation waveform in the DC link Voltage Variation(450[V] → 400[V], load 100[%])

V. 실험결과 및 검토

3상 PFC AC/DC 컨버터의 제원은 시뮬레이션에 적용된 컨버터 사양과 동일하게 하여 3상 PFC AC/DC 컨버터 실험 장치를 구성하고 실험을 수행하였다.

그림 10은 칼만필터를 이용한 센서리스 제어 실험에서 나타난 상전압과 가상자속 파형으로서 상전압과 가상자속추정이 양호하게 수행된 결과를 보이고 있다. 그림 11은 직류출력전압 500V일 때 초기 동작 시에는 무부하로 동작시키며, 임의의 시간에서 부하100% 인가한

실험결과로서 직류출력전압은 무 부하 상태에서 측정 한 입력전류에 노이즈 및 고조파 성분이 포함된 상태에서도 정확한 제어가 되고 있다.

그림 12-15는 정상상태에서 직류출력전압 변동 시 입력 전압과 전류위상을 검출하여 역률개선이 이루어 지는지 검증하였다. 그리고 그림 11에 적용한 전압 및 전류제어이득을 변경 없이 그림12-15에도 동일한 값을 적용하였다. 입력전류의 실험파형을 분석했을 때 사인 파는 고조파가 포함된 상태에서도 시스템은 안정적으로 가변직류출력전압이 제어되었다. 그리고 부하변동에서도 PFC제어와 직류출력전압은 양호한 결과를 보였다.

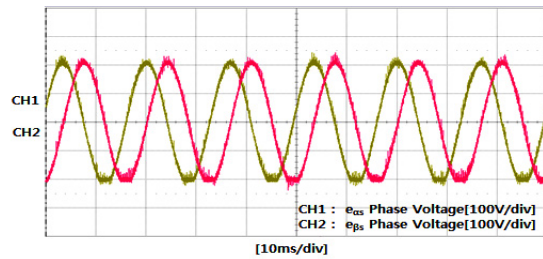


Fig. 10 Experimental waveform of $\hat{e}_{\alpha s}, \hat{e}_{\beta s}$ phase voltage and estimated $\hat{\psi}_{\alpha s}, \hat{\psi}_{\beta s}$ flux

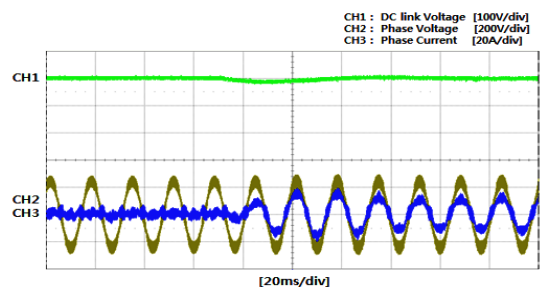


Fig. 11 PFC Experimental waveform in the case of the boost operation(500[V], No load → load 100[%])

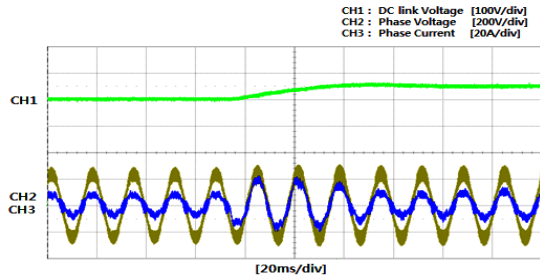


Fig. 12 PFC Experimental waveform in the case of the boost operation(400[V] → 450[V], load 100[%])

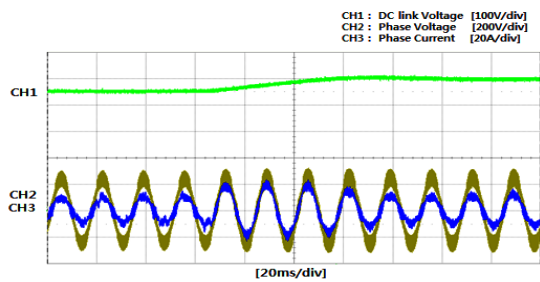


Fig. 13 PFC Experimental waveform in the case of the boost operation(450[V] → 500[V], load 100[%])

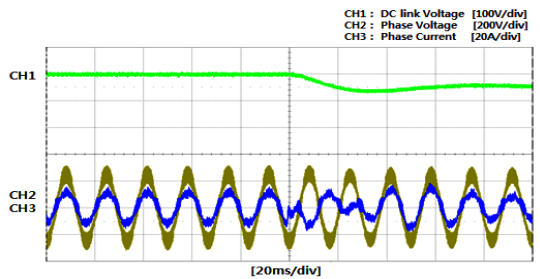


Fig. 14 PFC Experimental waveform in the case of the boost operation(500[V] → 450[V], load 100[%])

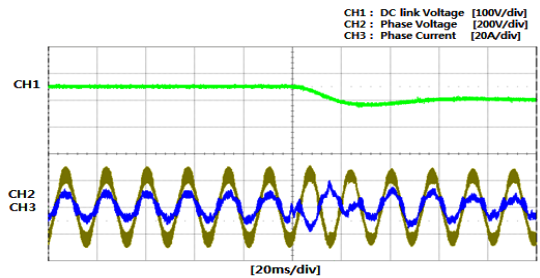


Fig. 15 PFC Experimental waveform in the case of the boost operation(450[V] → 400[V], load 100[%])

VI. 결론

본 논문에서는 3상 PFC AC/DC 컨버터에서 입력전류 노이즈를 능동적으로 필터링이 가능한 칼만 필터를 이용하여 가상자속추정에서 측정전압 적분을 적용하지 않는 센서리스 제어를 제안하였다. 칼만 필터를 이용한 센서리스 제어 방식은 가상자속추정, 입력전류 노이즈 및 전력오차를 감소할 수 있는 방식으로 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해서 3상 PFC AC/DC 컨버터를 구성하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험결과에서 역률개선이 양호하게 이루어지고 직류출력전압이 입력전류 노이즈, 가변출력전압 및 부하변동 상태에서도 양호한 제어가 이루어지는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] P. C. Krause, *Analysis of Electrical Machinery*, New York, McGraw- Hill, 1987.
- [2] Andreas Eberhard, "Improved PowerQuality AC/DC Converters," in *Power Quality*, Rijeka, InTech pub, ch. 14, pp. 271-310, 2011.
- [3] Bhim Singh, Brij N. Singh, Ambrish Chandra Kamal Al-Haddad, et al., "Review of Three-Phase Improved Power Quality AC-DC Converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 3, pp. 641-660, June 2004.
- [4] Seok-Kyoon Kim, Dae-Keun Choi, Kyo-Beum Lee, Young Il Lee, "Offset-Free Model Predictive Control for the Power Control of Three-Phase AC/DC Converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no.11, pp. 7114-7126, November 2015.
- [5] M. Orabi, T. Ninomiya, "Novel nonlinear representation for two-stage power-factor-correction converter instability," *Industrial Electronics 2003, ISIE 03 2003 IEEE International Symposium on*, vol. 1, pp. 270-274, June 2003.
- [6] M. Malinowski, M.P.Kazmierkowski, S.Hansen, F.Blaabjerg, and G. Marques, "Virtual-flux-based direct power control of three-phase PWM rectifiers," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 37, no.4, pp. 1019-1027, Jul./Aug. 2001.
- [7] Jie Li, Keqing Qu, "A method compensating for the steady-state error of the virtual flux observer used by the three-phase PWM converter," *Electrical Machines and*

- Systems (ICEMS), 2011 international conference on, Beijing, pp.1-5, 2011.*
- [8] Z. Zhang et al., "Predictive control with novel virtual flux estimation for back-to-back power converters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 2823-2834, May 2015.
- [9] S. P. Kim "Essential Kalman Filter," seoul, A-jin Press, 2010.
- [10] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," Univ .North Carolina, Chapel Hill, USA, Tech. Rep. TR 95-041, 2004.



박준성(Jun-Sung Park)

2011년 인제대학교 전자지능로봇공학과 학사.
현재 부산대학교 대학원 전자전기공학과 석사과정.
※관심분야 : 전력전자, 모터 드라이브 설계



권영안(Young-Ahn Kwon)

1978년 서울대 전기공학과 학사
1986년 동 대학원 전기공학과 박사.
현재 부산대학교 전기공학과 교수.
※관심분야 : 전력전자 및 전기기기