

확장된 동작 영역을 갖는 3상 전압원 PWM 컨버터 제어

민동기*, 안성찬^o, 현동석*^{*}한양대학교, ^o효성중공업

Control of a Three-Phase Voltage-Source PWM Converter with an Extended Operation Region

Min Dong-Ki*, Ahn Sung-Chan^o, Hyun Dong-Seok*^{*}Hanyang University, ^oHyosung Industries Co. LTD.

Abstract - In this paper, the operation regions of a three-phase voltage-source PWM converter are defined: linear modulation region, allowed current region, linear control region, unity power-factor region, and power-factor decreasing region. Particularly, the power-factor decreasing region is first examined and defined as the region where both the sinusoidal input current control and the stable DC link voltage regulation can not be obtained with a unity power-factor operation. To avoid these undesirable effects, the optimal current vector is derived, which ensures the sinusoidal input current and the stable DC link voltage regulation with maximum power-factor available, and, in consequence, it extends the operation region of the PWM converter. The validity of the proposed control scheme is proved by the computer simulation.

하게 개선되었으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 그 실효성을 증명하였다

I. 서론

3상 전압원 PWM 컨버터는 안정한 DC 링크 전압 제어 및 부하측 과잉 전력의 전원측 회생이 가능하고, 또한 입력 전류의 정현파 제어에 의한 저차 고조파 감소 그리고 입력단의 단위 역률 제어가 가능하기 때문에 고성능 전동기 구동 시스템의 정류부로 그 사용이 증가되고 있으며 이에 대한 연구가 활발하다[1~5]. 그러나 PWM 컨버터의 동작 영역은 체계적으로 규명되지 않았으며, 따라서 동작 영역의 규명 및 이에 따른 PWM 컨버터의 동작 특성 해석이 필요하다.

본 논문에서는 PWM 컨버터의 동작 영역을 전류 벡터 평면에서 구분하고 그 특성을 설명하였다. 특히 처음으로 규명된 감역률 영역의 특성을 설명하였으며, PWM 컨버터의 동작 영역을 확장시키는 새로운 최적 전류 벡터 제어 알고리즘을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 PWM 컨버터의 수학적 모델을 제시하였다. 이에 의하여 동작 영역을 구분하고 그 특성을 설명하였다. 다음으로 감역률 영역에서 PWM 컨버터를 제어하는 방법을 제시하였다. 제안된 최적의 전류 벡터 제어 방법으로 가능한 최대 역률을 확보하면서 전류의 정현파 제어와 안정된 DC 링크 전압의 확보가 가능하게 되어, PWM 컨버터의 동작 영역이 확장된다. 제안된 알고리즘으로 감역률 영역에서의 정상 상태 및 과도 상태 응답 특성이 현저

II. 3상 전압원 PWM 컨버터

증성점이 없는 3상 평형 전원과 인덕터를 입력으로 하는 3상 전압원 PWM 컨버터의 회로는 그림 1과 같다. 전원의 각 주파수 ω 로 회전하는 동기 좌표계의 dq 변수로 표현되는 PWM 컨버터의 수학적 모델은 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$\dot{\mathbf{I}}_{dq}(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{I}_{dq}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{E}_{dq}(t) - \mathbf{V}_{dq}(t)) \quad (1)$$

$$i_{DC}(t) = \frac{3}{2} \mathbf{S}_{dq}^T(t) \mathbf{I}_{dq}(t) \quad (2)$$

$$C\dot{v}_{DC}(t) = i_{DC}(t) - i_{LOAD}(t) \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}$, $\mathbf{X}_{dq} = [x_d \ x_q]^T$, $\mathbf{X} \in \{\mathbf{I}, \mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{S}\}$ 이고, $\mathbf{I}, \mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{S}$ 는 각각 입력 전류, 입력 전압, 컨버터 변조 전압, 스위칭 함수이고, R 은 등가 저항, L 은 입력 인덕턴스, C 는 DC 링크 커뮤니케이션스, v_{DC} 는 DC 링크 전압, i_{DC} 는 컨버터 출력 전류, i_{LOAD} 는 부하 전류이다.

정상상태에서는 시간에 대한 미분항이 0이 되므로 식 (1)은 식 (4)와 같이 된다.

$$\mathbf{V}_{dq} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}_e \mathbf{I}_{dq} + \mathbf{E}_{dq} \quad (4)$$

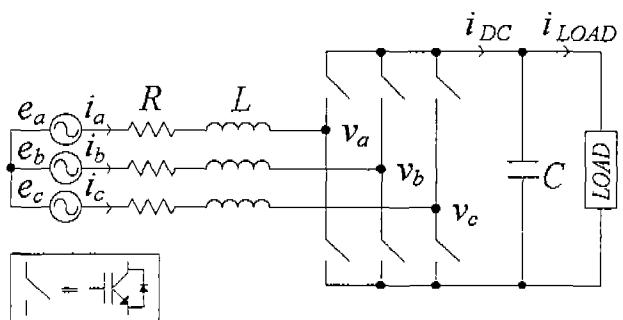


그림 1. 3상 전압원 PWM 컨버터
Fig. 1. Three-phase Voltage-Source PWM Converter

전원 전압 벡터 E_{dq} 의 q 축 성분이 0이 되도록 기준 좌표축을 놓으면, 전류 벡터 I_{dq} 의 d 축과 q 축 전류는 각각 입력 전력 및 입력 전류의 위상을 제어하게 된다. 즉, DC 링크 전압을 일정하게 유지하기 위하여 입력 전력이 부하 전력 P_{LOAD} 과 일치하도록 d 축 전류를 제어하고, 입력 축 역률을 최대로 하기 위하여 q 축 전류를 0으로 제어한다. 따라서 주어진 부하 조건에서 수렴되는 정상 상태의 전류 벡터는 식 (5)와 같다.

$$I_{dq} = [2P_{LOAD}/3E_d \quad 0]^T \quad (5)$$

III. 3 상 전압원 PWM 컨버터의 동작 영역

3 상 전압원 PWM 컨버터의 동작 영역을 선형 변조 영역, 허용 전류 영역, 선형 제어 영역, 단위 역률 영역, 그리고 감역 영역으로 구분하고 정상 상태의 전류 벡터를 기준으로 설명한다.

A. 선형 변조 영역 S_{LM}^I

선형 변조 영역은 전압 지령 벡터가 선형적으로 변조 가능한 영역으로, 공간 벡터의 개념을 이용하는 전압 변조 방식의 경우 스위칭 벡터로 이루어지는 육각형의 내접원 내부가 되며(그림 2의 빛금 친 영역), 그 크기는 DC 링크 전압 V_{DC} 에 의하여 정하여진다. 선형 변조 영역 S_{LM}^V 을 동기 좌표계의 전압 벡터 V_{dq} 를 이용하여 나타내면 식 (6)과 같다.

$$S_{LM}^V = \left\{ \left(V_d, V_q \right) \mid \left\| V_{dq} \right\|_2 \leq \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}} \right\} \quad (6)$$

여기서 $\|\cdot\|_2$ 은 ℓ_2 -norm이다.

전류 벡터 평면에서의 선형 변조 영역 S_{LM}^I 은 식 (6)의 선형 변조 영역 S_{LM}^V 을 식 (4)를 이용하여 나타낼 수 있으며, 그림 3과 같이 중심이

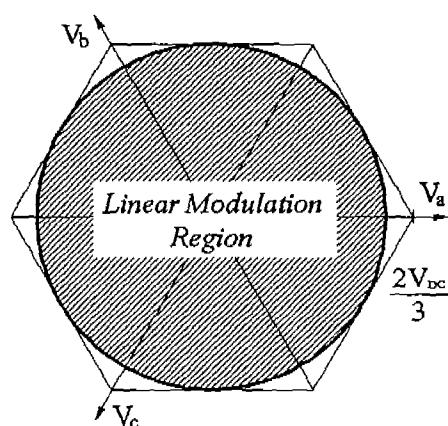


그림 2. 선형 변조 영역
Fig. 2. Linear Modulation Region

$-A_e^{-1}BE_{dq}$ 이고 반경이 $V_{DC}/(\lambda\sqrt{3})$ 인 원의 내부가 되며(그림 3) 식 (7)으로 표현된다.

$$S_{LM}^I = \left\{ (I_d, I_q) \mid \left\| I_{dq} + A_e^{-1}BE_{dq} \right\|_2 \leq \frac{V_{DC}}{\lambda\sqrt{3}} \right\} \quad (7)$$

여기서, $\lambda = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ 이다.

B. 허용 전류 영역 S_A^I

PWM 컨버터의 제한 전류 I_{LIMIT} 에 의하여 허용되는 전류의 영역을 허용 전류 영역 (allowed current region) S_A^I 이라 정의한다. 그림 3과 같이 전류 벡터 평면에서 중심이 원점이고, 반경이 I_{LIMIT} 인 원의 내부가 되며 식 (8)과 같이 된다.

$$S_A^I = \left\{ (I_d, I_q) \mid \left\| I_{dq} \right\|_2 \leq I_{LIMIT} \right\} \quad (8)$$

C. 선형 제어 영역 S_{LC}^I

전압 벡터가 선형적으로 변조되고, PWM 컨버터의 제한 전류 내에서 전류의 선형 제어가 가능한 동작 영역을 선형 제어 영역(linear control region) S_{LC}^I 이라 정의한다(그림 3의 빛금 친 영역). 전류 벡터 평면에서 선형 변조 영역 S_{LM}^I 과 허용 전류 영역 S_A^I 의 교집합이 된다. 즉,

$$S_{LC}^I = S_{LM}^I \cap S_A^I \quad (9)$$

선형 제어 영역 S_{LC}^I 은 입력 전원, 입력 인덕턴스, 컨버터의 제한 전류, 그리고 DC 링크 전압 크기의 함수가 되므로 선형 제어 영역을 고려하여 PWM 컨버터의 제어기를 설계하여야 한다[5].

D. 단위 역률 영역 S_U^I

단위 역률로 전류의 선형 제어가 가능한 d 축 상의 영역을 단위 역률 영역(unity power-factor region) S_U^I 이라 정의하며(그림 3의 짙은 실선)

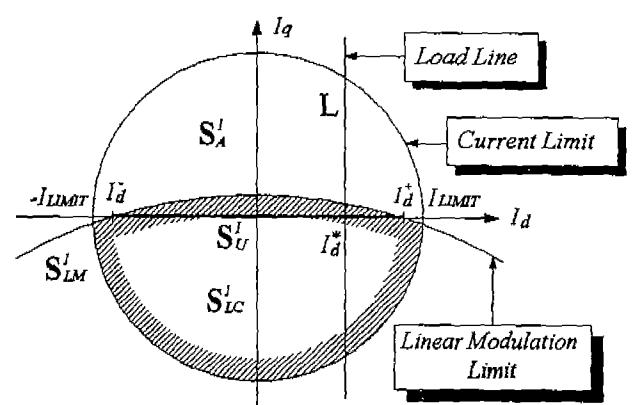


그림 3. PWM 컨버터의 동작 영역
Fig. 3. Operation Regions of a PWM Converter

식 (10)과 같이 표현된다.

$$S_U^I = \left\{ (I_d, I_q) \mid I_d \in [I_d^-, I_d^+] \& I_q = 0 \right\} \quad (10)$$

여기서 I_d^+ 와 I_d^- 는 $I_q = 0$ 을 만족하는 선형 제어 영역 S_{LC}^I 내의 d 축 전류의 경계값으로 기준 전류라 정의한다. 부하 조건(그림 3 의 직선 L)에 의하여 정해지는 식 (5)의 d 축 전류가 기준 전류(즉, 단위 역률 영역 S_U^I) 안에 존재하면, 입력 전류의 정현파 제어와 안정한 DC 링크 전압의 확보가 가능하고, 동시에 입력측의 단위 역률 제어가 가능하게 된다.

E. 감역률 영역 S_D^I

그림 4 와 같이 부하선 L에 대하여 입력측을 단위 역률로 제어하게 되면, d 축 전류는 기준 전류 범위 밖에 존재하게 된다. 따라서 입력 전류가 선형적으로 제어되지 않아 입력 전류에 저차 고조파가 발생되고 DC 링크 전압에 맥동이 생기게 된다. 이와 같이 단위 역률 제어와 동시에 입력 전류의 선형 제어가 불가능한 영역을 감역률(減力率) 영역(power-factor decreasing region) S_D^I 이라 정의하며(그림 4 의 굵은 실선) 식 (11)과 같다.

$$S_D^I = \left\{ (I_d, I_q) \mid I_d \notin [I_d^-, I_d^+] \& I_q = 0 \right\} \cap S_A^I \quad (11)$$

따라서 부하 조건에 의하여 PWM 컨버터의 동작점이 감역률 영역 S_D^I 안에 존재하면 시스템의 정상 상태 및 과도 상태 특성이 나빠지게 된다.

IV. 최적 전류 벡터 선정

그림 4에서 전류 지령 벡터 \hat{I}_{dq}^* 로 단위 역률 제어를 하여 PWM 컨버터의 동작점이 감역률 영역 S_D^I 에 존재하게 되면, 입력 전류에 저차 고조파와 DC 링크 전압에 맥동이 발생된다. 이러한

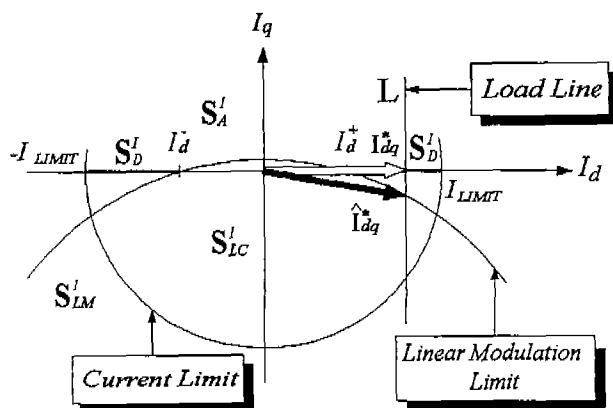


그림 4. 최적 전류 벡터 선정

Fig. 4. Derivation of the Optimal Current Vector

문제점을 해결하기 위하여 PWM 컨버터의 동작 점이 선형 제어 영역 S_{LC}^I 에 존재하도록 q 축 전류를 제어하여 입력측 역률을 낮추어야 한다(이러한 특성 때문에 감역률 영역이라 하였다).

제안된 최적 전류 벡터 \hat{I}_{dq}^* 는 부하 조건(부하선 L)을 만족하는 식 (5)의 d 축 전류와 선형 제어 영역 S_{LC}^I 에서 최대 역률을 갖도록 하는 최소 크기의 q 축 전류로 설정한다. 즉 부하선 L과 선형 변조 영역 S_{LM}^I 의 경계값의 교점이 되며, 최적 q 축 전류는 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\hat{I}_q^* = \sqrt{\frac{V_{DC}^2}{3\lambda^2} - \left(I_d^* - \frac{R}{\lambda^2} E_d \right)^2} - \frac{\omega L}{\lambda^2} E_d \quad (12)$$

최적 전류 벡터는 입력 전류의 선형 제어를 가능하게 하여 주어진 부하 조건에서 최대의 역률로 입력 전류를 정현적으로 제어하고 DC 링크 전압을 안정하게 제어할 수 있게 한다.

V. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 3상 평형 전원 220V를 사용하여 전류는 매 200μs마다 공간 벡터 방식의 동기 예측 제어를 하고, DC 링크 전압은 매 2ms마다 부하 전류의 전향 보상을 갖는 IP 제어를 수행하였다. 입력 인덕턴스 및 DC 링크 커패시턴스는 각각 1mH, 2200μF이다. DC 링크 전압은 PWM 컨버터가 감역률 영역에 동작하도록 300V의 낮은 전압으로 설정하였다.

그림 5은 10kW 부하에서 입력측을 단위 역률로 제어한 정상 상태 시뮬레이션 파형이다. 감역률 영역에서 전류는 지령값에 대해 선형적으로 제어가 되지 않고(그림 5(a)(b)), 이로 인하여 DC 링크 전압에 맥동이 발생된다(그림 5(c)). 그리고 입력 전류에는 많은 양의 저차 고조파가 포함되어 있음을 보인다(그림 5(d)).

그림 6은 같은 조건에서, 제안된 최적 전류 벡터로 제어한 정상 상태 시뮬레이션 파형이다. 전류는 선형적으로 제어되고 있으며(그림 6(a)(b)) DC 링크 전압도 안정하게 제어되고 있다(그림 6(c)). 그리고 입력 전류는 저차 고조파 없이 정현적으로 제어되고 있음을 알 수 있다(그림 6(d)).

그림 7은 1kW에서 10kW로의 부하 변동에 대하여 입력측을 단위 역률로 제어한 과도 상태 시뮬레이션 파형이다. 입력 전류 및 DC 링크 전압에 큰 오버슛트가 발생함을 알 수 있다.

그림 8은 같은 조건에서 제안된 최적 전류 제어 벡터로 제어한 과도 상태 시뮬레이션 파형이다. 부하 변동에 대하여 입력 전류와 DC 링크 전압의 과도 응답이 매우 우수함을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 3상 전압원 PWM 컨버터의 동작 영역을 선형 변조 영역, 허용 전류 영역, 선형 제어 영역, 단위 역률 영역과 감역률 영역으로 구분하였다. 특히 처음으로 규명된 감역률 영역에서는 단위 역률 제어로는 전류의 선형 제어가 이루어지지 않으며 전류의 저차 고조파와 DC 링크 전압 맥동이 발생되는 특성을 갖는다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 제안된 최적 전류 벡터 제어 방법은 PWM 컨버터가 감역률 영역에서 동작하는 경우 입력측 역률을 낮추어 가능한 최대의 역률로 전류의 선형 제어가 이루어 지도록 하여 정상 상태 응답 및 부하 변동에 대한 과도 상태 응답이 현저하게 개선된다.

따라서 동작 영역이 단위 역률 영역 S_U' 으로 제한되는 기존의 단위 역률 제어 방식에 비해 최적 전류 벡터 제어 방식은 더 넓은 동작 영역에서 전류의 정현파 제어 및 안정한 DC 링크 전압 확보가 가능하게 된다.

VII. 참고 문헌

- [1] J. W. Dixon, A. B. Kulkarni, M. Nishimoto, and B. T. Ooi, "Characteristics of a Controlled-Current PWM Rectifier-Inverter Link," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. IA-23, No. 6, 1987, pp.1022~1028.
- [2] R. Wu, S. B. Dewan, and G. R. Slemon, "A PWM AC-to-DC Converter with Fixed Switching Frequency," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. IA-26, No. 5, 1990, pp.880~885.
- [3] J. W. Kolar, H. Ertl, K. Edelmoser, and F. C. Zach, "Analysis of the Control Behavior of a Bidirectional Three-Phase PWM Rectifier System," *Conf. Rec. 4th European Conference on Power Electronics and Applications*, Firenze, 1991, Vol. 2, pp. 95~100.
- [4] T. G. Habetler, "A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/AC Converters," *IEEE trans. Power Electronics*, Vol. 8, No. 1, 1993, pp.30~36.
- [5] D-K. Min, S-C. Ahn, and D-S. Hyun, "Control of a PWM Converter in Different Input Voltage Conditions," will be published in *Proc. Of IECON '97 Conf.*, New Orleans, USA, 1997.

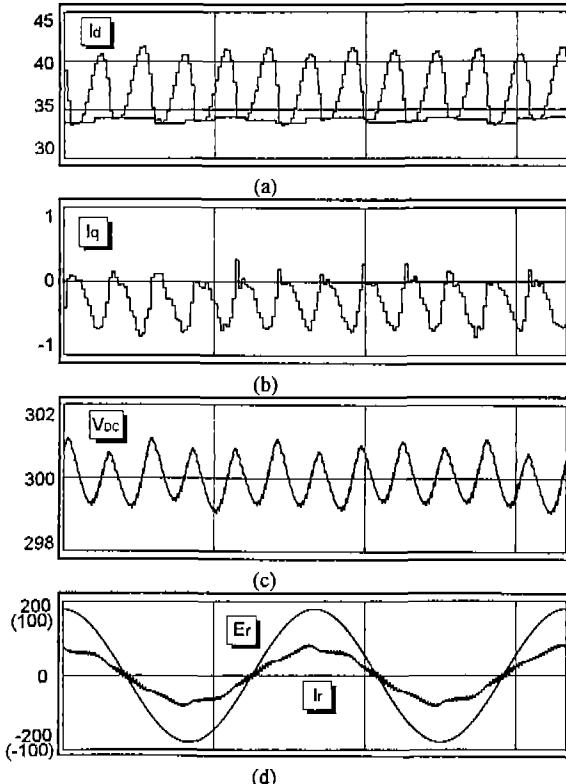


그림 5. 감역률 영역에서 단위 역률로 제어한 정상 상태 시뮬레이션 과정(10ms/div). (a) d 축 전류 (b) q 축 전류 (c) DC 링크 전압 (d) 입력 전압 및 전류(괄호 안의 값은 전류)

Fig. 5. Simulation results of the steady state response with unity power-factor control in the power-factor decreasing region(10ms/div). (a) d-axis current. (b) q-axis current. (c) DC link voltage. (d) input voltage and current(in parenthesis).

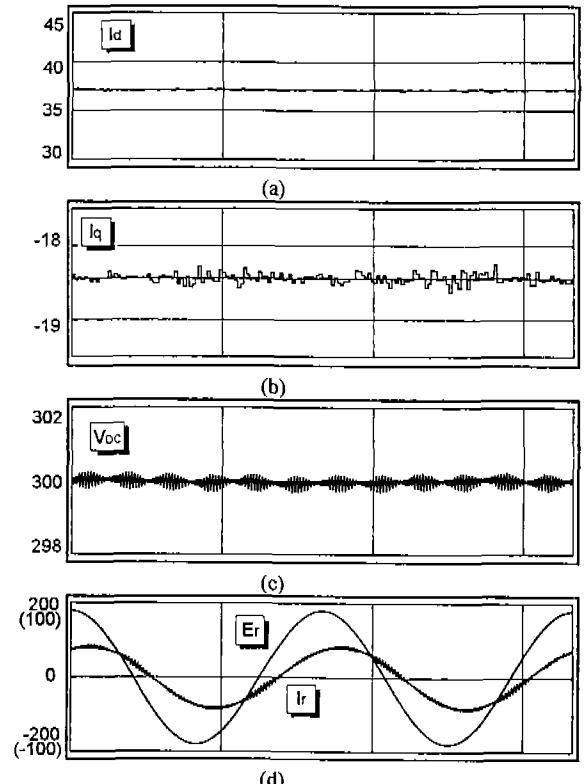


그림 6. 최적 전류 벡터로 제어한 정상 상태 시뮬레이션 과정(10ms/div). (a) d 축 전류 (b) q 축 전류 (c) DC 링크 전압 (d) 입력 전압 및 전류(괄호 안의 값은 전류)

Fig. 6. Simulation results of the steady state response with the proposed optimal current vector control(10ms/div). (a) d-axis current. (b) q-axis current. (c) DC link voltage. (d) input voltage and current(in parenthesis).

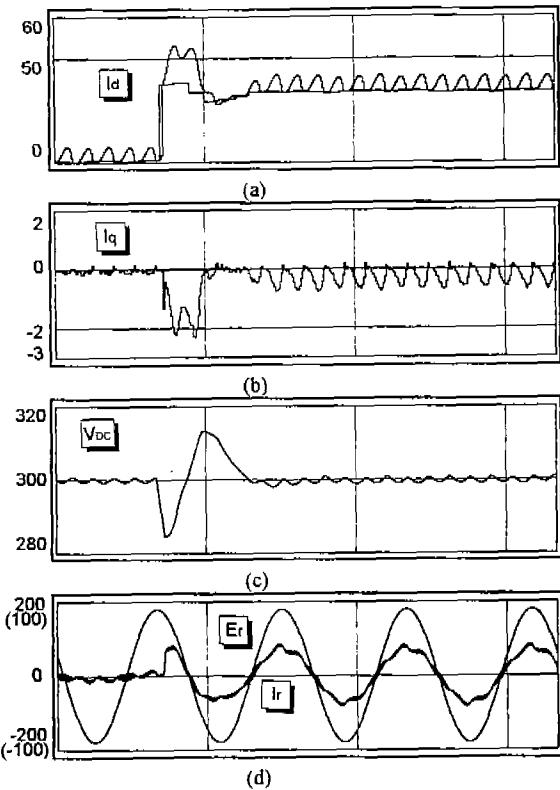


그림 7. 감역률 영역에서 단위 역률로 제어한 과도 상태 시뮬레이션 과정(20ms/div). (a) d 축 전류 (b) q 축 전류 (c) DC 링크 전압 (d) 입력 전압 및 전류(괄호 안의 값은 전류)

Fig. 7. Simulation results of the transient state response with unity power-factor control in the power-factor decreasing region(20ms/div). (a) d-axis current. (b) q-axis current. (c) DC link voltage. (d) input voltage and current(in parenthesis).

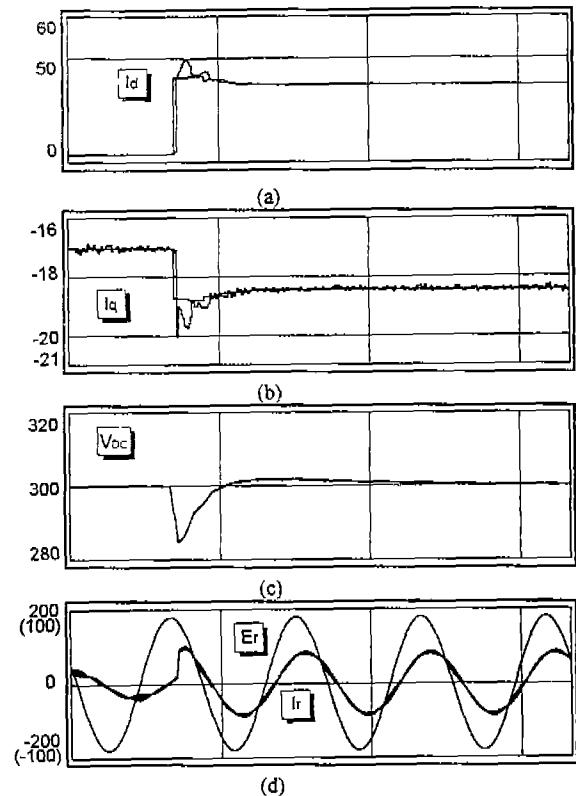


그림 8. 최적 전류 벡터로 제어한 과도 상태 시뮬레이션 과정(20ms/div). (a) d 축 전류 (b) q 축 전류 (c) DC 링크 전압 (d) 입력 전압 및 전류(괄호 안의 값은 전류)

Fig. 8. Simulation results of the transient state response with the proposed optimal current vector control(20ms/div). (a) d-axis current. (b) q-axis current. (c) DC link voltage. (d) input voltage and current(in parenthesis).