

중·대용량 STATCOM을 위한 새로운 60-스텝 인버터 시스템

김태훈*, 배영상**, 최세완**
(주)이화전기*, 서울산업대학교**

New 60-Step Inverter Systems for Medium-to-Large Scale STATCOM

Taehoon Kim, Youngsang Bae, Sewan Choi
Ehwa Technologies Information., Seoul National Univ. of Tech.

ABSTRACT

본 논문에서는 새로운 이중접속 방식의 60-스텝 인버터를 제안하고 이를 이용한 대용량 STATCOM에 관하여 동작원리 및 제어방식을 기술하기로 한다. 제안한 이중접속 방식의 60-스텝 인버터는 기존의 12-스텝 인버터에 간단한 보조회로를 추가하여 출력전압의 파형을 60-스텝으로 개선하였다. 제안한 방식의 인버터는 커패시터의 전압분할이 필요하지 않아 간접제어 방식의 적용이 용이하며 10Mvar~30Mvar급 이하의 STATCOM에 적용하면 경제적이다. 2KVA급 시작품의 실험 결과로부터 제안한 방식의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따라 전력품질에 대한 개선 요구가 증대되고 있다. 그중 무효전력 보상장치는 역률을 개선하고 계통을 안정화시키며 공급 전원을 일정하게 유지할 목적으로 이용되어진다. 싸이리스터 소자를 이용한 TSC(Thyristor Switched Capacitor)나 TCR (Thyristor Controlled Reactor)등과 같은 종래의 무효전력 보상장치는 GTO 소자를 이용한 전압형 인버터로 구성된 무효전력 보상장치 즉 STATCOM으로 대체 되고 있다^[1,2].

그중 중·대용량급에 적용하는 STATCOM은 높은 주파수의 PWM방식을 적용할 수 없기 때문에 낮은 주파수에서 180° 도통방식의 구형파모드로 동작시키고 여러 대의 6-스텝 인버터를 여러 대의 위상변압기를 이용하여 직렬 혹은 병렬로 결합함으로써 출력 용량을 높이는 것과 동시에 출력전압의 고조파도 제거할 수 있는 다중화 방식이 가장 많이 이용되고 있다. 공진문제를 일으킬 수 있는 수동필터의 사용을 최소화하기 위해서는 일반적으로 48-스텝 이상의 출력전압 파형을 요구하고 있다^[7]. 예

를 들어, 다중화 방식으로 48-스텝의 출력파형을 얻기 위해서는 8대의 6-스텝 인버터와 위상변압기가 각각 필요하게 된다. 그러나 용량측면에서 8대의 인버터가 필요하지 않은 경우 단지 출력 파형의 개선만을 위하여 다중화 방식으로 인버터를 구현하는 것은 소자수의 증가에 따른 비용이나 설치면적 등에서 비경제적이다.

따라서 이를 개선한 전원분할방식의 이중접속 전압원 인버터가 제안되었다^[3-5]. 이러한 이중접속방식은 2대의 인버터로 구성되는 기존의 12-스텝 인버터에 보조회로를 추가하여 리플전압을 주입함으로써 출력전압의 파형을 개선하는 방식이며 이는 두 대의 6-스텝 인버터가 감당할 수 있는 10Mvar~30Mvar급 이하의 용량을 갖는 인버터의 출력파형 개선을 위하여 효과적이다.

본 논문에서는 기존의 12-스텝 인버터에 두 대의 저용량(0.06P_o)의 상간 변압기와 두 대의 단상 인버터 및 한 개의 커패시터를 보조회로로 하여 인버터의 입력 측에 전압을 주입시켜 60-스텝의 출력 전압파형을 얻는 새로운 형태의 중·대용량급 STATCOM용 인버터를 제안하였다. 또한 이를 STATCOM에 적용하기 위한 동작원리 및 제어 방식을 기술하였고 2KVA급 STATCOM 시작품의 실험결과로부터 제안한 방식의 타당성을 입증하였다.

2. 제안한 60-스텝 인버터

그림 1은 제안한 60-스텝 인버터의 구성도를 나타낸다. 두 대의 3상 인버터 Inv_p 와 Inv_q 의 출력은 위상변압기 T₁과 T₂에 의해 결합되어 기본적으로 12-스텝 인버터의 구성을 이룬다. 이때 한편 위상변압기 T₁과 T₂의 결선으로부터 부하측의 $v_{\omega b}$ 는 3상 인버터의 선간 출력전압으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

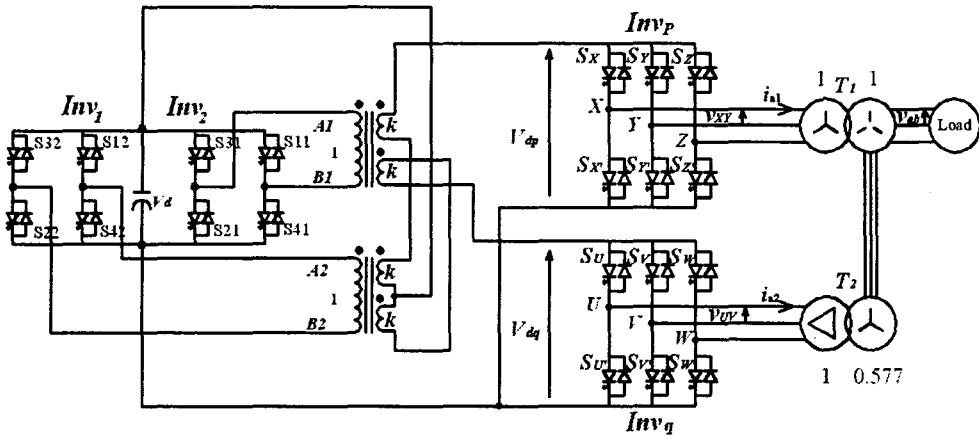


그림 1 제안하는 60-스텝 인버터 시스템

$$v_{ab} = v_{XY} + \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{UV} - v_{VW}) \quad (1)$$

또한 그림 2에서 보듯이 3상 인버터 Inv_p 와 Inv_q 는 180° 도통방식으로 구동되며 서로 30° 의 위상차를 갖도록 한다. 이때 각 3상 인버터 Inv_p 와 Inv_q 의 선간 출력전압은 다음과 같이 이들 인버터의 입력전압과 인버터의 게이트 신호로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{XY} &= (G_X - G_Y)v_{dp} \\ v_{YZ} &= (G_Y - G_Z)v_{dp} \\ v_{ZX} &= (G_Z - G_X)v_{dp} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{UV} &= (G_U - G_V)v_{dq} \\ v_{VW} &= (G_V - G_W)v_{dq} \\ v_{WU} &= (G_W - G_U)v_{dq} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 두 대의 단상 인버터 Inv_1 과 Inv_2 의 출력단자 A1-B1과 A2-B2에 그림 2와 같은 전압이 발생 되도록 게이트 신호를 만들어 준다. 이때 각각의 전압 v_{A1B1} , v_{A2B2} 는 각 단상 인버터에 사용된 스위치의 게이트 신호로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{A1B1} = (G_{11} - G_{31})V_d \quad (4)$$

$$v_{A2B2} = (G_{12} - G_{32})V_d \quad (5)$$

이와 같이 두 대의 단상 인버터에 의해 발생한 전압 v_{A1B1} , v_{A2B2} 는 $1:k$ 의 턴비에 의해 2차측에 유기 되므로 두 대의 3상 인버터의 입력전압 V_{dp} , V_{dq} 는 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$V_{dp} = V_d + k(v_{A1B1} + v_{A2B2}) \quad (6)$$

$$V_{dq} = V_d - k(v_{A1B1} + v_{A2B2}) \quad (7)$$

따라서 식 (1)~(7)에 의해서 출력전압 v_{ab} 는 다음과 같이 게이트 신호로 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ab} &= \frac{V_d}{\sqrt{3}} [\sqrt{3}(G_X - G_Y)(1 + k(G_{11} - G_{31} + G_{12} - G_{32})) \\ &\quad + (G_U - 2G_V + G_W)(1 - k(G_{11} - G_{31} + G_{12} - G_{32}))] \quad (8) \end{aligned}$$

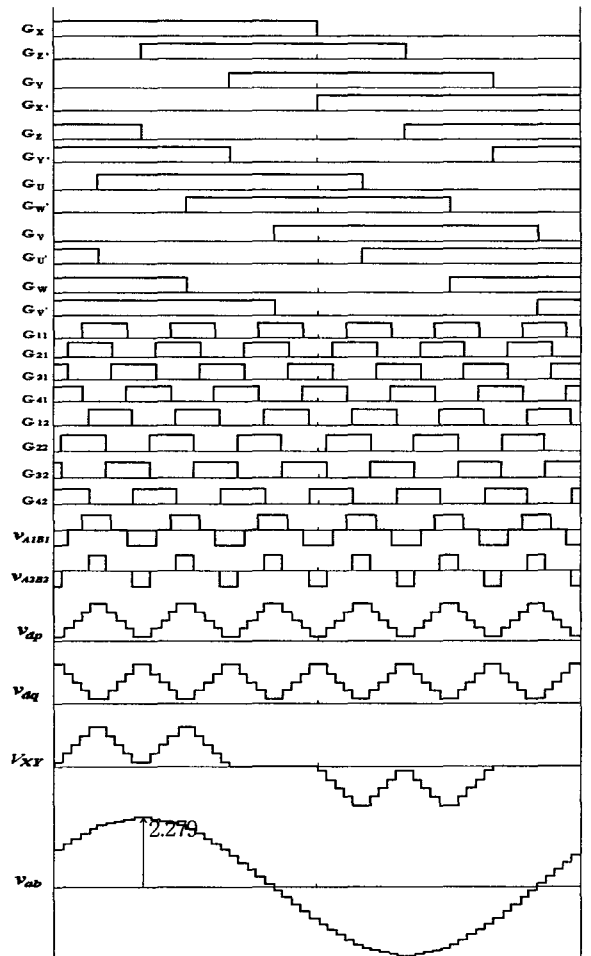


그림 2 60-스텝 인버터의 각부파형 ($V_d=1, k=0.4$)

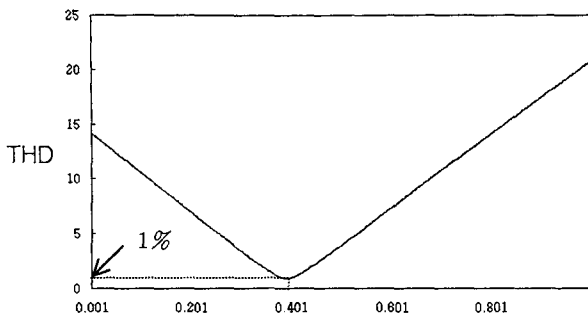


그림 3 턴비 k 에 따른 출력전압의 THD

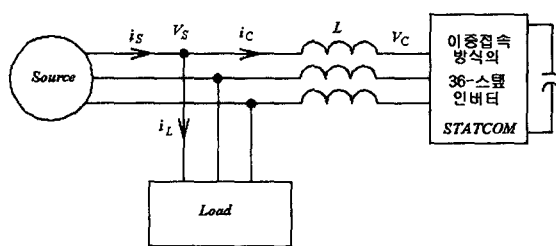
또한 턴비 k 에 따른 출력전압의 THD를 그림 3에 나타낸다. 그림 3으로부터 $k=0.4$ 일때 출력전압의 THD는 1%로 최소가 되고, 이때 출력전압 v_{ab} 의 파형은 그림 2에서 보듯이 60-스텝의 인버터로 나타난다. 이와 같이 보조회로에 의해 인버터의 입력 측에 전압을 주입하여 12-스텝의 출력전압 파형을 60-스텝으로 개선시킬 수 있다.

3. 제안한 60-스텝 인버터의 STATCOM 동작

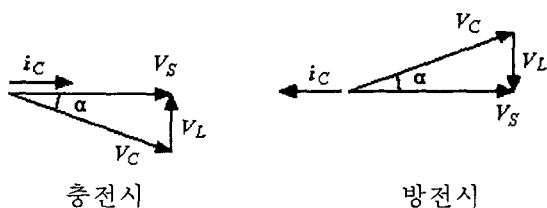
3.1 동작원리

그림 4는 STATCOM의 기본적인 구성 및 동작 원리를 나타낸다^[7]. 여기서 V_s 는 전원의 상 전압을 V_c 는 인버터 출력의 상 전압을 각각 나타낸다. 전원과 인버터 출력 사이에는 출력 변압기에 의해 연결되어 있으며 L 은 출력변압기의 누설 인덕턴스를 등가적으로 나타낸 것이다.

또한 전원 측으로 흐르는 전류는 i_s , 부하 측으로



(a) 구성도



(b) 페이지도

그림 4 STATCOM 동작원리

흐르는 전류는 i_L 그리고 인버터 측으로 흐르는 전류는 i_c 로 나타내었다.

그림 4(b)는 STATCOM 동작을 설명하기 위한 전압과 전류의 페이지도를 나타낸다. 전원 전압에 대해 인버터 출력전압이 뒤지는 경우에는 인덕턴스 L 에 걸리는 전압 V_L 은 이 전압에 90° 뒤지는 전류 i_c 를 흐르게 한다. 이렇게 발생된 i_c 는 전원전압 V_s 와 동상이 되며 이 경우 전력의 흐름은 전원 측에서 인버터 측으로 흐르게 되고 커패시터는 충전하게 된다. 이와 반대로 전원전압에 대해 인버터 출력 전압이 앞서는 경우에는 i_c 의 위상은 전원전압 V_s 와 역상이 된다. 따라서 전력의 흐름은 인버터 측에서 전원 측으로 흐르게 되고 커패시터는 방전을 하게 된다. 이렇게 인버터의 출력전압을 제어함에 있어서 전원전압에 대한 인버터의 출력전압의 위상을 변화시켜 전원 측과 인버터 측의 유효전력의 흐름을 조절하여 직류 커패시터의 전압의 크기를 가변시킴으로서 인버터 출력전압의 크기를 제어할 수 있는 방식을 간접제어(Indirect Control) 방식이라고 한다. 반면에 직접제어(Direct Control) 방식이란 커패시터의 전압의 크기를 일정하게 유지한 상태에서 출력전압의 펄스폭을 조절(PWM)하여 출력전압의 크기를 직접 제어하는 방식이다. 하지만, 본 방식과 같이 기본적으로 180° 도통방식의 구형과모드로 동작시키는 12-스텝 인버터에 전압을 주입시키는 이중접속 방식의 타입에서는 직접제어 방식을 적용하기 어려우므로 본 논문에서 제안한 새로운 60-스텝 인버터의 STATCOM 적용 방식에는 간접제어 방식을 적용한다.

본 논문에서 적용한 간접제어 방식에 의한 제안한 60-스텝 인버터의 동작을 그림 5에 나타낸다.

그림 5에서와 같이 전원전압의 위상정보 θ^* 를 기준으로 인버터 출력전압의 위상 θ 를 $-\Delta\alpha$ 만큼 위상을 뒤지게 해주면 유효전력이 직류 측으로 공급되어 커패시터 전압이 상승하고 이에 따라 인버터 출력전압이 $v_{cab}(-\Delta\alpha)$ 와 같이 커지게 된다. 이와 반대로 θ^* 를 기준으로 인버터 출력전압의 위상 θ 를 $+\Delta\alpha$ 만큼 위상을 앞서게 해주면 유효전력이 교류 측으로 공급되어 커패시터 전압이 하강하고 이에 따라 인버터 출력전압이 $v_{cab}(+\Delta\alpha)$ 와 같이 작아지게 된다. 이러한 간접제어 방식을 구현하기 위한 제어 블록도를 그림 6에 나타낸다^[7]. 먼저 3상 전원전압과 전류를 검출하여 다음과 같이 3상→2상의 변환을 행한다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s,a} \\ v_{s,b} \\ v_{s,c} \end{bmatrix} \quad (9)$$

4. 실험결과

STATCOM 시작품에 적용하여 실험하였으며 사용된 파라미터는 다음과 같다.

- 무효전력 추종치 : $q_s^* = 1\text{Kvar}$ 또는 $q_s^* = -500\text{ var}$
- 3상 전원 선간전압 : $v_{s\text{ab}} = 212\text{V}$
- 직류 축 커패시터 용량 : $3300\mu\text{F}$
- 등가 인덕턴스 L : 5mH

그림 7에서 $q_s^* = 0$ 에서 $q_s^* = 1\text{Kvar}$ 로 변하는 순간 위상 지연각 α 는 음(-)의 값을 가지게 되어 인버터의 출력전압은 전원전압에 뒤지게 되고 이때 커패시터 측으로 흐르는 전류 i_d 는 평균값이 음(-)의 값이 되어 커패시터는 충전을 하게 된다. 따라서 인버터의 출력전압은 커지게 되고 전원전압에 앞서는 진상의 보상전류 i_a 가 점차 증가하게 된다. 현재의 무효량 q_s 가 무효전력 추종치 q_s^* 와 같아질 때까지 커패시터는 충전을 하며 $q_s = q_s^*$ 일 때 커패시터는 일정한 전압을 유지하고 일정한 양의 무효량을 보상하게 된다.

이와 반대로 그림 8은 $q_s^* = 0$ 에서 $q_s^* = -500\text{var}$ 로 변하는 순간의 실험 결과를 나타낸다. 그림 7에서의 반대로 인버터의 출력전압은 작아지게 되고 전원전압에 뒤지는 지상의 보상전류 i_a 가 발생하게 된다. 실험결과에서 알 수 있듯이 60-스텝의 동작으로 인버터의 출력 전압이 정현파에 가까우므로 보상되는 전류의 파형도 정현파에 가까운 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 중·대 용량급의 출력 파형 개선에 적합한 새로운 토폴로지의 60-스텝 인버터를 제안하였으며 무효전력 보상장치인 STATCOM에 적용하여 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다. STATCOM응용에 제안된 60-스텝 인버터는 보조회로로서 저 용량($0.06P_o$)의 상간 변압기 2대와 2대의 단상 인버터만을 이용하여 60-스텝 (THD=1%)의 출력 파형을 얻을 수 있다. 또한 본 방식은 커패시터의 분할전압이 필요하지 않아 용이하게 간접 제어 방식을 적용할 수 있다. 본 방식에서의 새로운 60-스텝 인버터는 특히 10Mvar~30Mvar급 이하의 STATCOM에 적용하면 경제적이다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구지원 (R01-2001-000-00306-0)으로 수행되었음.

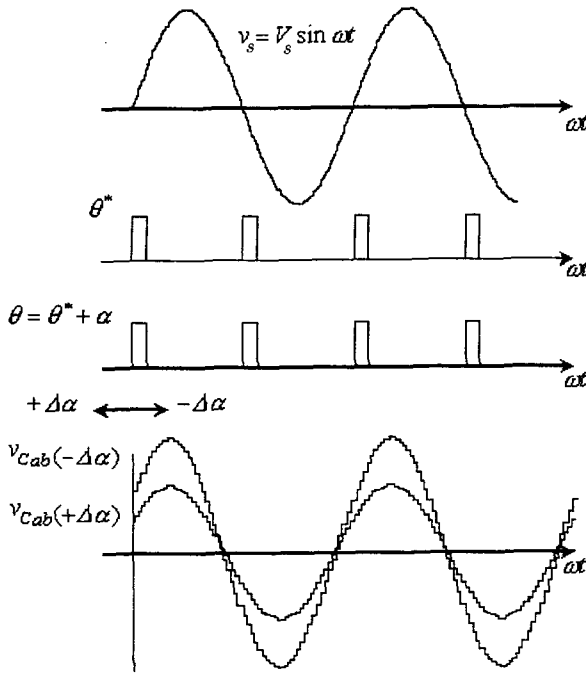


그림 5 제안하는 인버터의 간접제어

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s,a} \\ i_{s,b} \\ i_{s,c} \end{bmatrix} \quad (10)$$

이러한 pq 이론에 의해 전원 측 무효전력의 크기 q_s 는

$$q_s = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (11)$$

와 같이 구할 수 있으므로 추종치 q_s^* 와 비교하여 그 오차를 PI 제어기로 입력하고 PI 제어기는 원하는 만큼의 위상 지연각 α 를 출력하게 된다. 한편 3상 전압으로부터 PLL회로를 거쳐 전원 전압과 동상인 위상정보 θ^* 를 얻게 되면 위상 지연각 α 와 합하여 최종 인버터 출력전압의 위상정보 θ 를 계산할 수 있다. 이 θ 를 이용하여 게이트 드라이버에서 게이트 신호를 만들어 내게 된다.

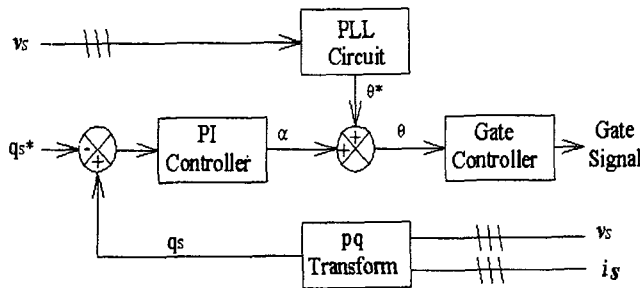


그림 6 간접 제어 방식의 블록도

참 고 문 헌

- [1] S. Mori, et al., "Development of large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability", *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 8, No. 1, pp. 371~377, Feb. 1993.
- [2] C. Schauder, et. Al., "Development of a ± 100 Mvar static condenser for voltage control of transmission systems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, Vol. 10, No. 3, pp. 1486~1493, July. 1995.
- [3] 최세완, 양승욱, "단상 인버터 동작에 의한 이중 접속 3상 전압원 인버터의 출력파형개선" *전력전자학회 논문지*, 제6권, 제1호, pp. 21~26. 2001.
- [4] K. Oguchi, A. Kawaguchi, T. Kubota, N. Hoshi, "A Novel Six Phase Inverter System With 60-Step Output Voltages for High-Power Motor Drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 35, pp. 1141~1149, September./ October. 1999.
- [5] Shigeo Masukawa, S. Iida, "A Method for Reducing Harmonics in Output Voltage of a Double-Connected Inverter", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 9, pp. 543-550, Sep. 1994.
- [6] 김태훈, 배영상, 최세완, 이왕하, "이중접속방식의 멀티스텝 인버터를 이용한 대용량 STATCOM의 개발" *전력전자학회 논문지*, 제9권, 제1호, pp. 36~41, 2004.
- [7] Narain G. Hingorni, Laszlo Gyugyi, *Understanding FACTS*, IEEE PRESS, pp. 135~265, 2000.

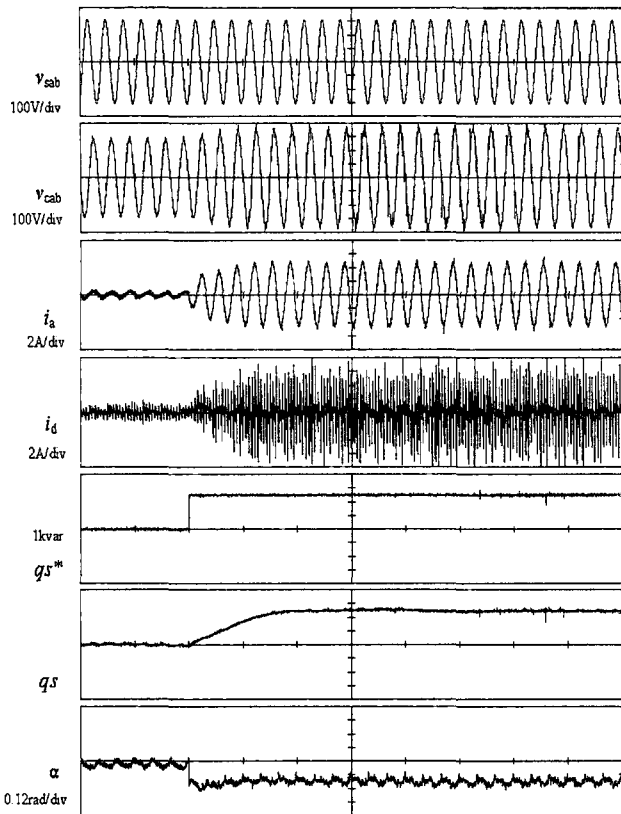


그림 7 실험 파형 ($q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = 1\text{Kvar}$)

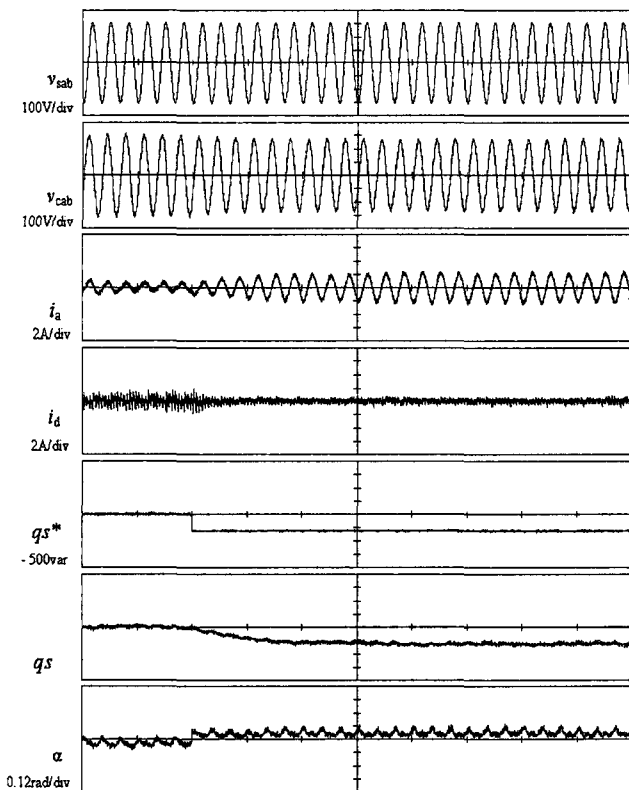


그림 8 실험 파형 ($q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = -500\text{var}$)