

이중접속방식의 멀티스텝 인버터를 이용한 대용량 STATCOM의 개발

김태훈*, 배영상*, 최세완*, 이왕하**
 *서울산업대학교, **포항산업과학연구원

Development of a Large Scale STATCOM Using Double-Connected Multistep Inverter

T.H. Kim*, Y.S. Bae*, S.W. Choi*, and W.H. Lee**
 *Seoul National University of Technology, **RIST

ABSTRACT

본 논문에서는 이중접속 방식의 멀티스텝 인버터를 이용한 대용량 STATCOM에 관하여 동작원리 및 제어 방식을 기술하기로 한다. 기존의 12-스텝 인버터에 상간 변압기 및 간단한 보조회로를 이용하여 출력전압의 파형을 36-스텝으로 개선하였다. 이러한 방식의 인버터는 10Mvar~30Mvar급 전후의 STATCOM에 적용하면 경제적이다. 2KVA급 STATCOM 시제품의 실험결과로부터 제안한 방식의 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

전력수요의 지속적인 증가에 따라 안정된 양질의 전원공급이 시급한 문제로 부각되고 있다. 이에 전력품질의 개선을 위하여 계통을 안정화하고 공급전원을 일정하게 유지할 목적으로 무효전력 보상장치의 적용이 증가하는 추세이다. 이와 관련하여 사용되던 TSC (Thyristor Switched Capacitor)나 TCR (Thyristor Controlled Reactor) 등과 같은 재래식 무효전력보상장치는 최근 제어성능이 우수한 전압형 인버터 방식의 STATCOM으로 대체되고 있다.^[1,2] 동작주파수가 수백Hz 정도인 GTO싸이리스터를 사용하는 중대용량급의 STATCOM에서는 PWM방식을 적용하여 고품질의 전압파형을 얻기 어려우므로 다중화 방식이 사용되고 있다. 이 방식의 장점은 복수대의 인버터와 위상변압기를 직렬 혹은 병렬로 결합함으로써 인버터의 출력전압 혹은 전류의 정격을 높일 수 있고, 저차 고조파를 제거하여도 고차 고조파가 증대되지 않아 높은 파형 개선의 효과를 얻는 동시에 복수대의 인버터를 사용하기 때문에 이중 일부가 고장 시에도 분리시켜 계속 운전이 가능하므로 시스템의 신뢰성이 매우 높다. 이러한 다중화 방식으로 36-스텝 인버터를 구현하기 위해서 6대의 인버터 (즉 36개의 스위칭 소

자)와 6대의 위상변압기를 사용하여야 하는데 단지 출력 파형을 개선하기 위하여 인버터를 다중화하는 것은 비용이나 설치 면적 등에서 비경제적이다. 따라서 두 대의 6-스텝 인버터로 구성 가능한 10Mvar에서 50Mvar급 사이의 인버터의 출력 파형 개선을 위하여 두 대의 6-스텝 인버터와 위상변압기로 12-스텝 인버터를 구성하고 보조회로를 부가하여 전압을 주입시킴으로서 출력전압의 파형을 더욱 개선하는 이중접속방식의 인버터가 제안되었다.^[3-7] 본 논문에서는 보조회로로서 상간변압기와 4개의 스위칭 소자를 이용하여 주입전압을 발생시키는 이중접속방식의 인버터를 STATCOM에 적용하기 위하여 동작원리 및 제어방식을 기술하였다.

2. 상간 변압기를 이용한 이중접속 방식 멀티 스텝 인버터

그림 1은 상간 변압기를 이용한 이중접속 방식 인버터를 나타낸다.^[6] 두 대의 3상 인버터 INVp과 INVq는 위상변압기에 의해 결합되어 기본적으로

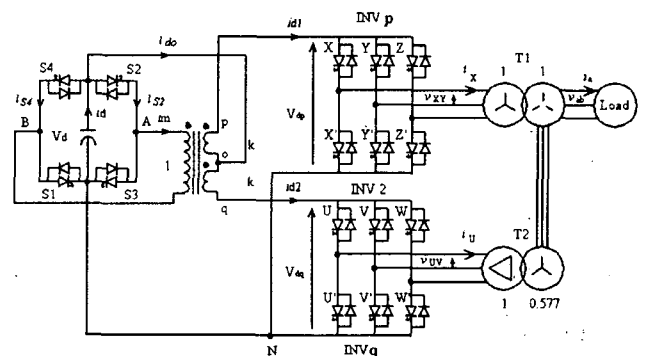


그림 1 상간변압기를 이용한 이중접속방식 36-스텝 인버터
 Fig. 1 Double connected 36-step inverter using interface transformer

12-스텝 인버터의 구성을 이룬다. 3상 인버터 INVp과 INVq는 180° 도통방식으로 구동되며 서로 30°의 위상차를 갖도록 한다. 입력 측 전원 V_d 에 연결된 Chain컨버터는 전위 'A'와 'B'사이에서 주입전압을 발생시키며 주입전압 v_{AB} 는 Chain컨버터에 이용된 스위치의 게이트 신호로 표현할 수 있다.

$$v_{AB} = (G_{S1} - G_{S3})V_d \quad (1)$$

이렇게 Chain컨버터에 의해 발생한 리플전압 v_{AB} 는 상간 변압기의 턴수 비 1:k로 인버터 입력측에 전압을 유기시키게 되는데 전위 'p'와 전위 'o' 그리고 전위 'q'와 전위 'o'사이의 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{po} = kv_{AB} \quad (2)$$

$$v_{qo} = -kv_{AB} \quad (3)$$

각 3상 인버터의 입력전압은

$$v_{dp} = V_d + v_{po} \quad (4)$$

$$v_{dq} = V_d + v_{qo} \quad (5)$$

이고, 각 인버터의 출력전압은 다음과 같이 인버터의 입력전압과 인버터의 게이트 신호로 나타낼 수 있다. INVp의 선간 출력 전압은

$$v_{XY} = (G_X - G_Y)v_{dp} \quad (6)$$

$$v_{YZ} = (G_Y - G_Z)v_{dp}$$

$$v_{ZX} = (G_Z - G_X)v_{dp}$$

이고 또한 INVq의 선간 출력전압은

$$v_{UV} = (G_U - G_V)v_{dq} \quad (7)$$

$$v_{VW} = (G_V - G_W)v_{dq}$$

$$v_{WU} = (G_W - G_U)v_{dq}$$

로 된다. 한편 위상변압기 T1과 T2의 결선으로부터 부하측의 선간 출력전압 v_{ab} 는 인버터의 선간 출력전압으로 표현할 수 있다.

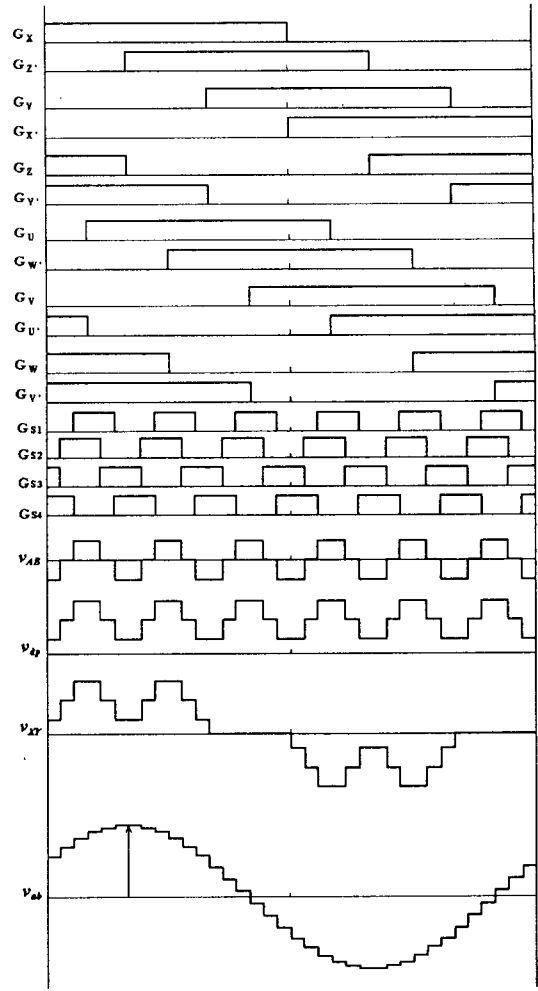


그림 2 36-스텝 인버터의 각부파형 (k=0.654)
Fig. 2 Various waveforms of the 36-step inverter

$$v_{ab} = v_{XY} + \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{UV} - v_{VW}) \quad (8)$$

따라서 식 (1)에서 (8)로부터, v_{ab} 는 다음과 같이 된다.

$$v_{ab} = \frac{V_d}{\sqrt{3}} [\sqrt{3}(G_X - G_Y)(1 + k(G_{S1} - G_{S3})) + (G_U - 2G_V + G_W)(1 - k(G_{S1} - G_{S3}))] \quad (9)$$

여기서 출력전압의 THD는 다음과 같이 정의되며

$$THD = \sqrt{\frac{V_{ab}}{V_{ab,1}} - 1} \times 100 \quad (10)$$

k=0.654 일 때 출력전압의 THD는 3.99%로 최소화된다. [6] 각 부의 전압 파형을 그림 2에 나타내었다. 이

와 같이 상간변압기를 이용한 전압의 주입으로 12-스텝의 출력 파형이 36-스텝으로 개선된 것을 알 수 있다.

3. STATCOM의 기본원리 및 제어방법

3.1 STATCOM의 기본원리

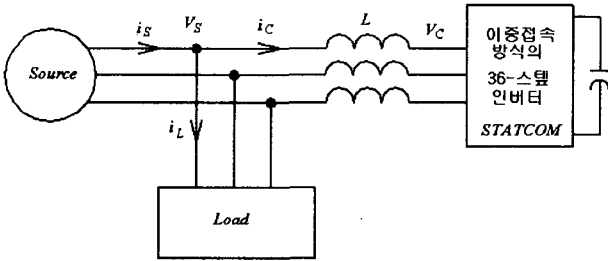


그림 3 STATCOM의 구성도
Fig. 3 Basic configuration for STATCOM

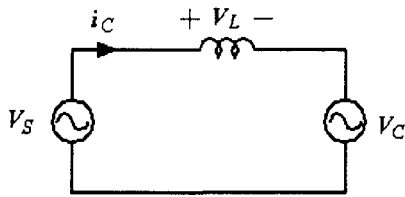


그림 4 단상등가 회로
Fig. 4 Single phase equivalent circuit

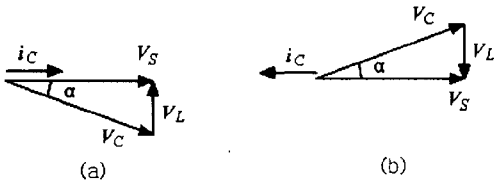


그림 5 페이지도
Fig. 5 Phase diagram

그림 3은 STATCOM의 기본적인 구성도를 나타낸다. 여기서 V_s 는 전원의 상전압을 나타내며 V_c 는 인버터 출력의 상전압을 나타낸다. 전원과 인버터 출력 사이에는 출력 변압기에 의해 연결되어 있으며 그림 3에서의 L 은 출력변압기의 누설 인덕턴스를 등가적으로 나타낸 것이다. 또한 전원 측으로 흐르는 전류는 i_s , 부하 측으로 흐르는 전류는 i_L 그리고 인버터 측으로 흐르는 전류는 i_c 로 나타내었다. 그림 4에서는 그림 3의 회로도에서 부하 측을 제외한 단상등가 회로를 표현하였다. 이러한 단상 등가 회로에 대한 전압과 전류의 페이지를 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 (a)는 전원전압에 대해 인버터 출력전압이 뒤지는 경우의 페이지도를 나타낸다. 이러한 경우 L 에 걸리는 전압 V_L 에 의해 인

버터 측으로 흐르는 전류 i_c 의 위상은 전원전압 V_s 와 동상이 된다. 이 때 전력의 흐름은 전원 측에서 인버터 측으로 흐르게 되며 인버터 측의 직류커패시터는 충전을 하게 된다. 이와 반대로 그림 5의 (b)는 전원전압에 대해 인버터 출력전압이 앞서는 경우이며 i_c 의 위상은 전원전압 V_s 와 역상이 된다. 이 때 전력의 흐름은 인버터 측에서 전원 측으로 흐르게 되며 인버터 측의 직류커패시터는 방전을 하게 된다. 즉 전원전압에 대한 인버터의 출력전압의 위상을 변화함에 따라 전원 측과 인버터 측의 전력흐름을 조절하여 직류 커패시터의 전압의 크기를 가변 할 수 있게 되고 인버터 출력전압의 크기를 제어할 수 있게된다. 이러한 원리를 STATCOM 제어에 적용하게 되는데 커패시터 전압의 크기를 일정하게 유지하며 출력전압의 도통각을 조절하여 보상되는 무효량을 결정하는 방법이 직접(Direct control)제어 방식이며 커패시터 전압의 크기에 따라 보상되는 무효량을 결정하는 방법이 간접 제어(Indirect control)방식이다. 본 논문에서는 간접제어 방식으로 STATCOM을 제어하였다.

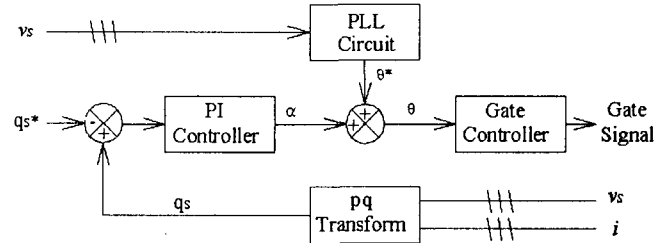


그림 6 간접 제어 방식의 블록도
Fig. 6 Block diagram of Indirect control method

3.2 STATCOM의 제어방법

그림 6에 간접제어 방식에 의한 블록도를 나타낸다. 먼저 3상 전원전압과 전류를 검출하여 3상 2상의 변환을 수행한다. 3상 2상 변환 수식은

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

와 같고, pq 이론에 의해 무효전력 의 크기 q_s 는

$$q_s = e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha \quad (13)$$

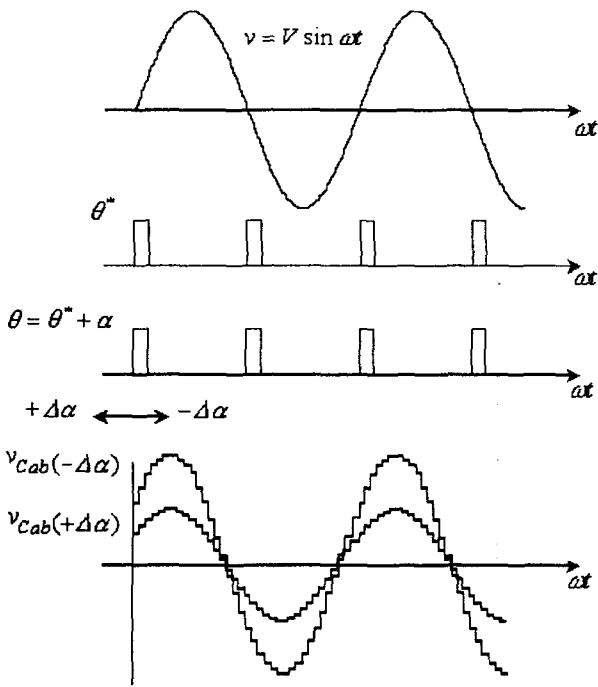


그림 7 36-스텝 인버터의 간접제어 방식
Fig. 7 Indirect control of 36-step inverter

이며 이 q_s 를 무효전력 추종치 q_s^* 와 비교하여 PI 제어기로 입력하면 PI제어기는 필요한 만큼의 위상 지연각 α 를 출력하게 되고, 이것은 다시 PLL회로에서 얻어진 전원전압의 위상정보 θ^* 와 더해져 인버터 출력전압의 위상정보 θ 를 만들어 낸다. 이 θ 에 의해 인버터를 구동할 게이트 신호를 만들어 주며 현재 무효전력 q_s 가 무효전력 추종치 q_s^* 에 도달할 때까지 반복 수행하게 된다. 간접제어 방식에 대한 36-스텝 인버터의 파형을 그림 7에 나타낸다. 여기서 v 는 전원측 상전압, v_{Cab} 는 인버터의 선간 출력전압을 나타낸다. 그림 7에서 알 수 있듯이 전원전압의 위상정보 θ^* 를 기준으로 $-\Delta\alpha$ 만큼 위상을 뒤지게 해주면 $v_{Cab}(-\Delta\alpha)$ 만큼 인버터 출력전압의 크기도 커지게 된다. 이와 반대로 θ^* 를 기준으로 $+\Delta\alpha$ 만큼 위상을 앞서게 해주면 $v_{Cab}(+\Delta\alpha)$ 만큼 인버터 출력전압의 크기도 작아지게 된다.

4. 실험결과

상간변압기를 이용한 이중접속방식 인버터를 STATCOM에 적용하여 실험하였으며 실험 구성도는 그림 8과 같다. L_s 는 전원 측 임피던스, L 은 전원 측과 인버터 측 사이의 연계 임피던스이다. 무효전력 추종치는 '0'에서 q_s^* 를 추종하는 방식으로 실험이 이루어 졌으며 실험 조건은 아래와 같다.

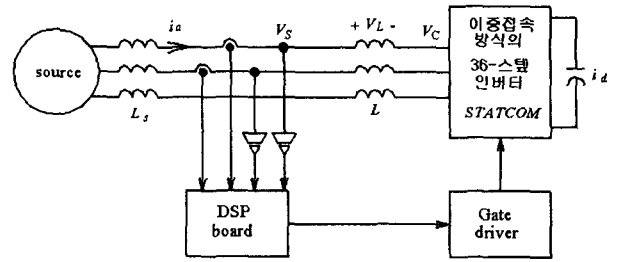


그림 8 실험 구성도

Fig. 8 Experimental system configuration

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

그림 9는 $q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = 1\text{Kvar}$ 일 때의 실험결과를 보여준다. $q_s^* = 0$ 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 충전될 하게 된다. 커패시터가 충전을 함에 따라 인버터의 출력전압은 커지게 되고 전원전압에 앞서는 진상의 보상전류 i_a 가 점차 증가하게 된다. 현재의 무효량 q_s 가 무효전력 추종치 q_s^* 가 같아 질 때까지 커패시터는 충전을 하며 $q_s = q_s^*$ 일 때 커패시터는 일정한 전압을 유지하고 일정한 양의 무효량을 보상하게 된다. 이와 반대로 그림 10은 $q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = -500\text{var}$ 일 때의 실험결과이다. $q_s^* = 0$ 에서 $q_s^* = -500\text{var}$ 로 변하는 순간의 실험 결과를 나타낸다. 그림 8에서와 반대로 인버터의 출력전압은 작아지게 되고 전원전압에 뒤지는 지상의 보상전류 i_a 가 발생하게 된다. 실험결과에서 알 수 있듯이 36-스텝의 동작으로 인버터의 출력 전압이 정현파에 가까우므로 보상되는 전류의 파형도 정현파에 가까운 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 중·대 용량급의 출력 파형 개선에 유용한 이중접속 방식 인버터를 STATCOM에 적용하였으며 실험을 통하여 이중접속 방식 인버터의 STATCOM 적용의 타당성을 입증하였다. STATCOM 응용에 제안된 이중접속방식 인버터는 보조회로로써 소용량의 상간 변압기와 4개의 스위칭 소자만을 이용하여 36-스텝($THD=3.99\%$)의 출력 파형을 얻을 수 있다. 이러한 이중접속 인버터는 10Mvar~30Mvar급 전후의 STATCOM에 적용하면 경제적이다.

참고 문헌

- [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] 양승욱, 최세완, 문건우, 조정구, "SVC적용을 위한 새로운 이중접속방식의 멀티스텝 인버터", *전력전자 학회 논문지*, 제4권, 제6호, pp. 547-553, 1999.
- [4] 최세완, 양승욱, "단상 인버터 동작에 의한 이중접속 3상 전압원 인버터의 출력파형개선" *전력전자 학회 논문지*, 제6권, 제1호, pp. 21-26, 2001.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 김태훈, 최세완, 박기원, 이왕하, 고전압 대용량을 위한 새로운 인버터 토폴로지 전기학회 논문지, 제52권, 제2호, pp. 80-86, 2003.

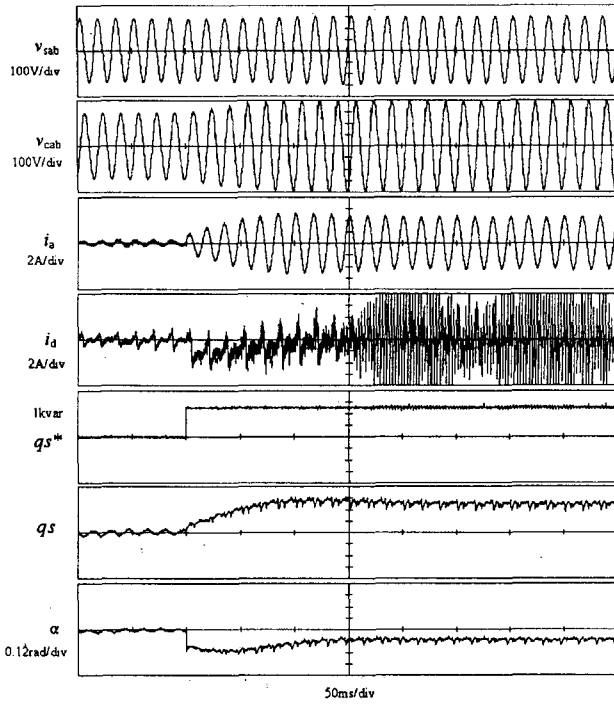


그림 9 36-스텝 인버터를 이용한 STATCOM의 실험 파형

$q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = 1\text{kvar}$ 일 때

Fig. 9 Experimental waveform of STATCOM using 36-step inverter $q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = 1\text{kvar}$

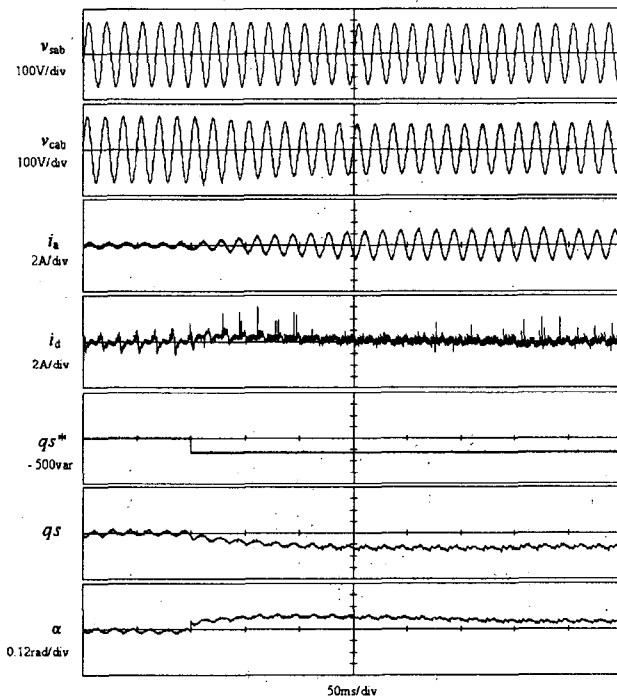


그림 10 36-스텝 인버터를 이용한 STATCOM의 실험 파형

$q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = -500\text{var}$ 일 때

Fig. 10 Experimental waveform of STATCOM using 36-step inverter $q_s^* = 0 \rightarrow q_s^* = -500\text{var}$