

The Dynamic Characteristics Analysis of the STATCOM According to the Realization of the STATCOM Output Voltage

金 鮮 淩* · 元 東 俊** · 韓 學 根*** · 李 松 根§ · 文 承 逸 §§
(S. H. Kim · D. J. Won · H. G. Han · S. K. Lee · S. I. Moon)

Abstract -Recently Advanced Static Var Compensators(ASVC) or STAtic Synchronous COMPesator(STATCOM) has been considered as a next generation reactive power controller. The STATCOM is a voltage source inverter(VSI) based on the static VAr compensator with only small capacitors on the dc side. The main function of the STATCOM is to keep the bus voltage magnitude at the desired value. This paper compares the PAM STATCOM with the PWM STATCOM. The characteristics and the control method of each model is analyzed. And the simulation of STATCOMs based on the above two methods is presented.

Key Words : STATCOM, PAM STATCOM, PWM STATCOM, Dynamic Characteristics

1. 서 론

전력시스템에서 어느 특정 버스의 전압크기를 조정하기 위해서 무효전력을 공급해 주는 방법이 널리 쓰여왔다. 과거에 사용되던 기기들은 동기조상기, 기계적 스위치를 단 커페시터와 인덕터, 그리고 포화리액터 등이 일반적이었고, 60년대 후반부터는 싸이리스터에 의해 조절되는 리액터(TCR) 또는 싸이리스터 스위치가 달린 커페시터(TSC)가 사용되어 왔다. 최근에 와서는 전압원 인버터를 사용한 STATCOM이 제안되어 많은 연구가 진행되고 있다. STATCOM은 기존의 무효전력 보상기들에 대해 큰 무효전류, 빠른 제어 응답, 향상된 제어 안정도, 적은 고조파, 그리고 더 작은 크기 등과 같은 많은 장점들을 가지고 있는 것으로 보고되고 있다[1]. 이런 장점들을 갖는 STATCOM은 기기의 크기가 기존의 것보다 훨씬 작기 때문에 설치비용을 감소시킬 수 있다는 장점을 가지며 시스템에는 더 큰 유연성을 줄 수 있다[2].

STATCOM의 구현을 위해 제안된 방법들을 살펴보면 전압원 인버터의 출력전압을 어떤 방식으로 구성하고, 어떻게 제어 할 것인가에 따라 PAM(Pulse Amplitude Modulation)방식을 사용하는 STATCOM과 PWM(Pulse Width Modulation)방식을 사용하는 STATCOM으로 나눌 수 있다.

본 논문에서는 위의 두 가지 방식의 STATCOM 모델들

이 갖는 특성을 검토하고, 각각의 구현방식에서 쓰이는 제어방법을 비교, 분석했으며, 각 방식으로 STATCOM을 구성한 후 모의한 결과를 살펴보았다.

2. 구현 방식에 따른 각 STATCOM 특성 및 제어방식 비교

2.1 STATCOM

STATCOM은 전압원 인버터와 직류커패시터로 구성되어 있는 차세대 무효전력 보상장치라고 할 수 있다. STATCOM의 기본구성은 그림 1과 같다. STATCOM은 변압기를 통해 전력시스템에 병렬로 연결되어 근본적으로 회전동기보상기와 같은 방식으로 무효전력을 흡수 또는 공급한다. 하지만 회전동기보상기의 기계적인 관성이나 긴 여자시간은 없다[2].

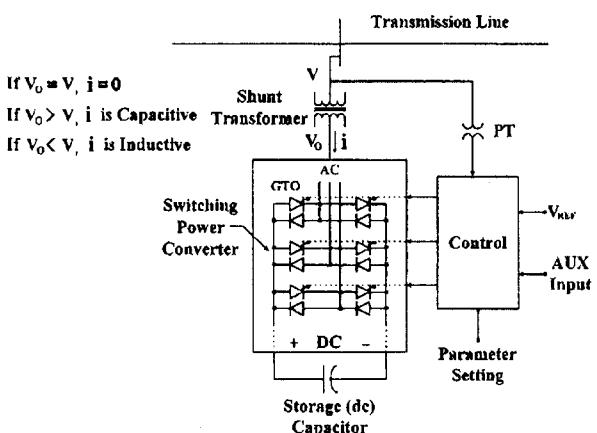


그림 1 STATCOM의 기본 구조

Fig. 1 Basic configuration of the STATCOM

* 準會員 : 서울大 電氣工學部 碩士
** 正會員 : 서울大 電氣工學部 博士課程
*** 正會員 : 東洋工業専門大學 教授 · 工博
§ 正會員 : 全州大 電子媒體工學部 教授 · 工博
§§ 正會員 : 서울大 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 11月 6日

最終完了 : 2000年 5月 29日

전력계통에 투입된 STATCOM은 근본적으로 coupling reactance 뒤에 있는 교류전압으로 이해될 수 있으며(그림 2), 이 교류전압은 직류 커패시터에 의해 작동하는 GTO 싸이리스터 인버터에 의해 구현된다. STATCOM을 구성하는 이 인버터를 구동하는 방식에 따라 PAM STATCOM과 PWM STATCOM으로 구분할 수 있다.

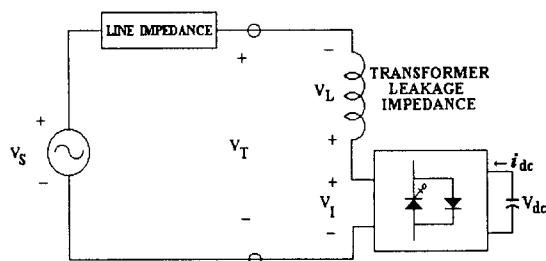


그림 2 송전계통과 STATCOM의 단상 개념도

Fig. 2 One phase diagram of the STATCOM in the power system

STATCOM에서 제어되는 출력전압은 무효전력을 공급할 경우에는 시스템전압과 같은 일치하고 크기는 조금 크게 유지되고, 무효전력을 흡수하는 경우에는 역시 같은 시스템전압과 일치시키되 그 크기는 선로전압의 크기보다 조금 작게 유지된다. 선간전압이 평형을 유지하면, STATCOM으로 출입하는 유효전력은 항상 합이 0이다. 따라서 에너지 저장용 직류 커패시터는 이론적으로 불필요하나 직류측과 교류측의 에너지 평형을 유지하면서 무효전력을 송전계통에서 흡수 또는 공급하는데 필요하다. 이 때 STATCOM에서 발생하는 전력 손실은 전력 시스템으로부터 유효전력을 받아서 보상한다[3].

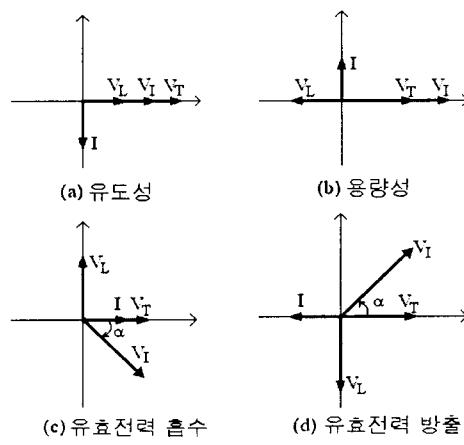


그림 3 STATCOM 위상도

Fig. 3 The phase diagram of the STATCOM

인버터와 교류전력계통 사이에서 유·무효전력의 상호교환은 인버터의 출력전압과 연결점의 모선전압과의 위상차를

조절함으로써 제어가 가능하다. 만일, 인버터의 출력전압 VI가 모선의 단자전압 VT와 동상이고, VI>VT 이면 STATCOM은 무효전력을 송전계통에 공급하며, VI<VT 이면 STATCOM은 송전계통에서 무효전력을 흡수한다. 이상적으로는 VT와 VI의 위상이 동상이나 실제로는 변압기의 권선과 인버터의 손실이 있어 이 손실을 보상하기 위해 약간의 유효전력을 공급해야 하므로 인버터의 출력전압은 단자전압과 약간의 위상차를 갖는다.

STATCOM의 무효출력전류에 대한 시스템 전압의 특성을 기존 SVC(Static Var Compensator)의 특성과 비교해 보면 기존 SVC는 최대 출력에선 제어되지 않는 커패시터 뱅크가 되기 때문에 전류가 전압에 비례하여 감소하지만 STATCOM은 약 0.15 per unit정도의 시스템 전압까지 최대한의 용량성 전류를 공급할 수 있음을 보이고 있다.[1] 이것은 STATCOM이 기존의 SVC에 비해 더욱 넓은 작동범위를 갖고 있으므로 전력시스템을 좀더 유연하게 해 줄 수 있음을 보인다.

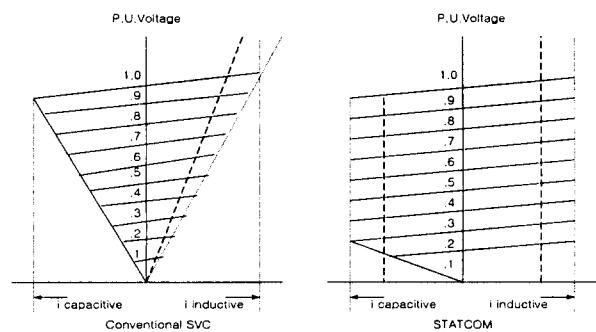


그림 4 STATCOM의 전압-전류 특성

Fig. 4 The current-voltage characteristics of the STATCOM

2.2 PAM STATCOM

PAM 방식은 기본이 되는 3상 GTO 전압원 인버터의 회로를 이용하여 얻을 수 있다. 기본이 되는 6-펄스 운전시의 회로도는 그림 5와 같다. 그림 6은 6펄스의 출력 상전압을 공간 벡터로 나타낸 것이다. 6-펄스 인버터에서 얻는 출력파형은 5, 7 고조파가 많이 발생하므로 고조파를 억제하는 방법의 하나는 정현파에 가까운 출력을 얻을 수 있도록 회로를 만드는 것이다.

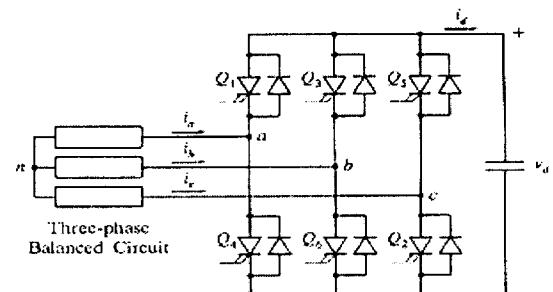


그림 5 GTO 전압원 인버터회로

Fig. 5 The GTO voltage sourced inverter circuit

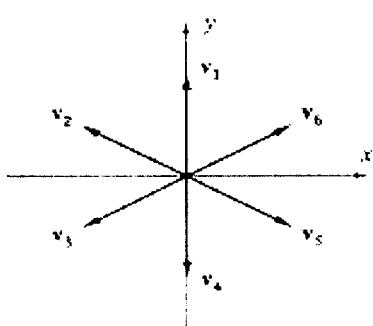


그림 6 인버터 출력 상전압의 공간벡터

Fig. 6 The space vector of the inverter voltage output

그러므로, 정현파에 가까운 출력을 얻기 위해서 PAM 방식에서는 변압기를 사용하여 12-펄스 시스템을 얻을 수 있다. 변압기를 1차 측은 병렬로 연결하고 2차 측은 직렬로 연결함으로써 STATCOM 출력 전압은 각 인버터의 출력 전압들이 합해진 것이 되며, 인버터 직류 측의 입력 전류는 각 인버터의 입력 전류들이 합해진 것이 된다.

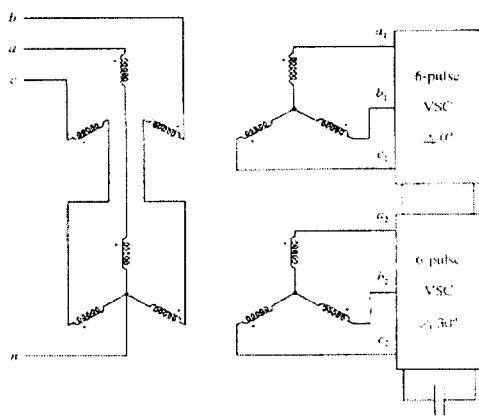


그림 7 12펄스 GTO 인버터 회로

Fig. 7 12 Pulse GTO inverter circuit

그림 7의 시스템은 11, 13 고조파 외에 5, 7 고조파도 발생하게 되는데 이와 같이 발생하는 저차 고조파를 억제하기 위하여 이상변압기를 사용할 수 있다. 이상 변압기를 사용하여 다-펄스를 만들 경우에는 회로가 매우 복잡하게 되어 제작에 많은 어려움이 따른다. 저차 고조파를 억제하면서도 회로가 비교적 간단한 Y-△결선을 사용할 수 있다.

12-펄스 이상의 다-펄스 시스템으로도 확장이 가능하다. 3개의 인버터가 직·병렬 운전되면 18-펄스 시스템이 되며 인버터가 하나씩 추가되면서 24, 30, 36등으로 펄스 수가 증가하게 된다. 일반적으로, 직·병렬 운전되는 인버터의 수를 k 라고 하면, 펄스 수가 $6k$ 가 되며, 이 때 주고조파의 차수는 $6k \pm 1$ 이 된다.

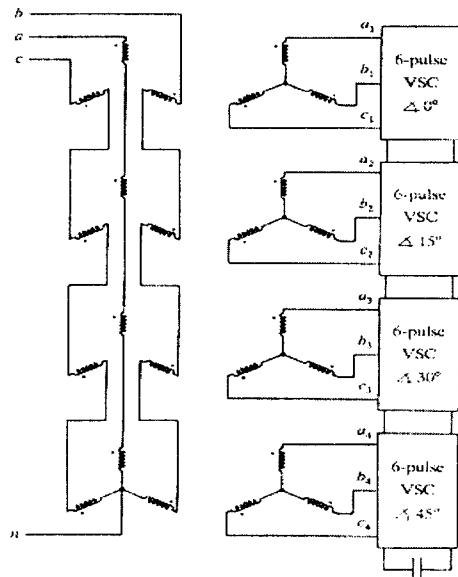


그림 8 24-펄스 GTO 인버터 회로

Fig. 8 24-Pulse GTO inverter circuit

위에서 살펴보았듯이 변압기를 이용한 다-펄스 방식은 인버터를 추가할 때마다 변압기를 필요로 하고 있음을 볼 수 있다. PAM방식은 복잡한 형태의 자기회로가 필요한 것을 알 수 있다. 자기회로는 설치시 비교적 많은 공간과 비용이 들게 된다. 이 방법을 해결하기 위하여 개발된 것이 Multi-level 인버터 방식이다. Multi-level 인버터 방식을 이용하여 자기회로의 단점이었던 복잡한 자기회로를 사용하지 않고 또한, PWM방식의 최대 단점인 스위칭 소자의 스위칭 주파수를 높이지 않으면서도 자기회로를 이용한 출력 파형과 같은 형태의 파형을 얻을 수 있다. 한 상의 N-level 인버터 회로가 그림 9에 나타나 있다[4]. 여기서 $N' = \frac{N-1}{2}$

이다. 3상을 이루기 위해서는 그림 9와 같은 회로가 2개 더 필요하게 된다. 이 방법의 장점은 각 싸이리스터가 모든 DC 전압을 받는 것이 아니고 한 레벨의 전압만을 받게 된다. 각 싸이리스터는 역방향 다이오드를 갖고 있어 각 싸이리스터에 한 레벨의 전압보다 높은 전압이 걸리지 않게 된다. 이로써 싸이리스터를 높은 전압이 걸리는 것으로부터 보호할 수 있게 된다. 하반부의 GTO 싸이리스터는 상반부와 보완적으로 게이팅 신호를 주게 된다. 즉, Q_k 가 켜지면 Q_k' 은 꺼지게 된다. 그러므로 각 전압 레벨은 하나의 싸이리스터가 켜지고 꺼지는 것에 의하여 생기게 된다. 한 예로 5-레벨 인버터를 구성한 회로가 그림 10에 보인다. 이때의 출력 파형은 그림 11과 같다.

Multi-level 인버터의 또 다른 장점은 원하는 고조파를 제거할 수 있다는 것이다. 예로서, 그림 11에서 α_1 과 α_2 의 게이팅 신호를 각각 5.1429° , 30.8571° 로 합으로써 5 고조파와 7 고조파를 제거할 수 있게 된다. 일반적으로 N-레벨 인버터인 경우에는 N이 홀수인 경우에는 $\frac{(N-1)}{2}$ 고조파를

제거할 수 있고 N 이 짹수인 경우에는 $\frac{N}{2}-1$ 고조파를 제거할 수 있다. 그러므로, PAM방식은 인버터내의 GTO 소자들을 적절한 스위칭패턴과 자기회로를 이용하여 싸인파에 가까운 다중펄스로 형성된 출력전압을 만든다. PAM 방식에선 다중펄스 출력전압이기 때문에, 고조파의 발생이 상대적으로 작고 운전 손실도 작다.

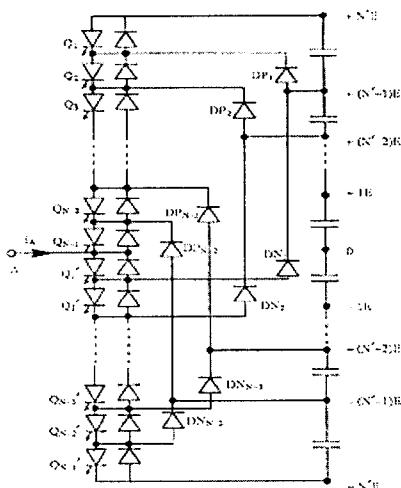


그림 9 N-레벨 인버터 회로
Fig. 9 N-Level Inverter circuit

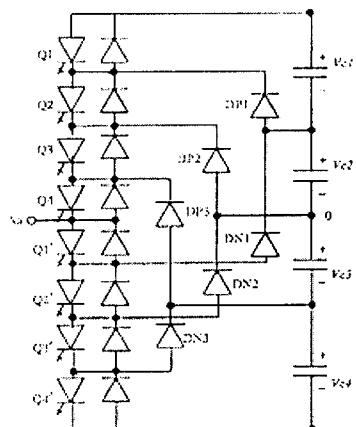


그림 10 5-레벨 인버터 회로
Fig. 10 5-Level Inverter circuit

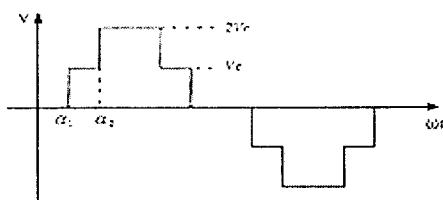


그림 11 5-레벨 인버터 출력파형
Fig. 11 5-Level Inverter voltage output

2.3 PWM STATCOM

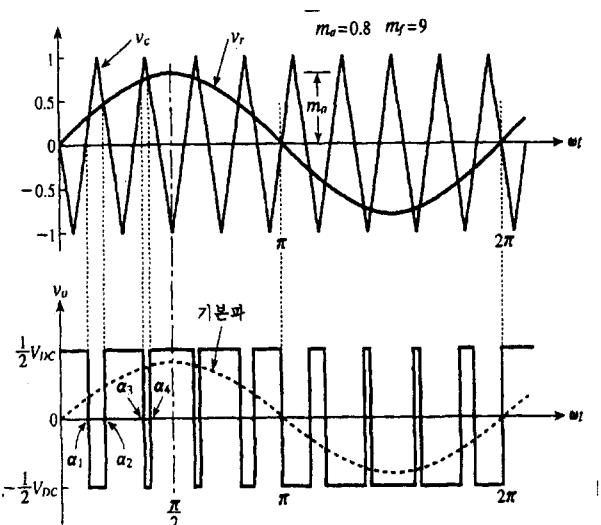


그림 12 정현파 PWM 제어
Fig. 12 Sinusoidal PWM control

PWM STATCOM은 기준 전압파형을 삼각파와 비교하여 인버터 내부 GTO 소자의 점호시기를 결정하는 정현파 PWM 제어를 사용하는 STATCOM이다. 정현파 PWM 제어는 인버터의 스위칭 순간이 일정한 규칙에 따라 실시간적으로 결정되는 출력전압 제어방식으로, 매 순간 순시적으로 출력전압의 기본파 성분의 크기와 주파수를 제어할 수 있다. 그림 12는 정현파 PWM 제어의 동작원리를 나타내고 있다. 정현파의 기준파 v_r 과 삼각파의 반송파 v_c 를 비교하여 스위칭 순간을 결정하는 방법을 나타내고 있다. 기준파는 진폭 m_a , 주파수 f 인 정현파이고, 반송파는 진폭 1, 주파수 f_c 인 삼각파이다. 일반적으로 m_a 는 진폭변조지수 (amplitude modulation index)라고 하며, m_f 는 주파수 변조지수라고 하며 다음과 같이 정의 된다.

$$m_a = \frac{v_r}{v_c}, \quad m_f = \frac{f_c}{f}$$

이때 인버터의 출력전압의 기본파 성분은 다음과 같다.

$$v_f = \frac{V_{DC}}{2} m_a \sin \omega t$$

따라서 인버터의 출력전압을 필터링한 후 정현파 STATCOM 출력전압을 얻을 수 있으며, STATCOM 출력전압의 크기는 진폭변조지수 m_a 를 통하여 조절가능하고, 주파수는 기준파의 주파수 f 를 통하여 조절할 수 있다[5].

2.4 PAM방식과 PWM방식 STATCOM의 특성비교

STATCOM을 구현하는 방식은 앞서 언급한 대로 PAM 방식과 PWM방식이 있다. 이는 STATCOM의 인버터에서 나오는 출력전압을 싸인파로 형성하는 방식의 차이라고 할 수 있다.

PAM 방식에서는 DC 커패시터의 양단 전압을 띠고 있는 인버터내의 GTO 소자들을 적절한 스위칭패턴과 자기회로를 이용하여 싸인파에 가까운 다중펄스로 형성된 출력전압을 만든다. 따라서 PAM방식은 다중펄스방식이라고도 말할 수 있다[6]. PAM 방식에선 다중펄스 출력전압이기 때문에, 고조파의 발생이 상대적으로 작고 운전 손실도 작다[7]. 다만 이 방식은 다중펄스 방식 인버터의 사용으로 출력전압을 구성할 때 필요한 복잡한 형태의 자기회로가 있으므로 설치시 비교적 많은 공간과 비용이 듈다.

PWM방식은 일반적으로 기준전압 파형을 삼각파와 비교하여 인버터 내부 GTO 소자의 점호시기를 결정하고, 여기서 나오는 인버터의 출력전압을 필터로 통과시켜 STATCOM의 출력전압을 만든다. PWM 방식 STATCOM은 PWM 방식에서 필요한 필터가 PAM 방식 STATCOM에서 사용되는 특수한 자기회로 보다는 그 크기가 작으므로 PWM 방식 STATCOM은 공간적인 제약이 많이 있는 곳에 적합한 것으로 여겨진다[6]. 하지만 PWM STATCOM은 많은 스위칭으로 인해 비교적 손실이 PAM STATCOM 보다는 많고[7], 현재까지는 전력소자 기술의 한계로 많은 스위칭을 할 수 있는 대용량 전력소자의 제작에 어려움이 있기 때문에, 이 PWM방식을 이용하여 STATCOM을 제작하는 것은 앞으로 나올 것으로 기대되는 대용량 고속 전력소자의 출현 이후로 미루어 질 것이다. 표 1에서 이 두 가지 구현방식의 특성을 정리했다.

표 1 PAM/PWM 방식 STATCOM 특성비교

Table 1 The comparison of PAM/PWM STATCOM characteristics

	PAM ST.	PWM ST.
기기의 특성	자기회로	고조파 필터
기기의 크기	비교적 크다	비교적 작다
설치 비용	비교적 많다	비교적 적다
제어	비교적 어렵다	비교적 쉽다
스위칭 손실	비교적 적다	비교적 많다
구현가능성	현재 구현 가능	전력전자기술의 발달에 달려있음

2.5 제어 방식 비교

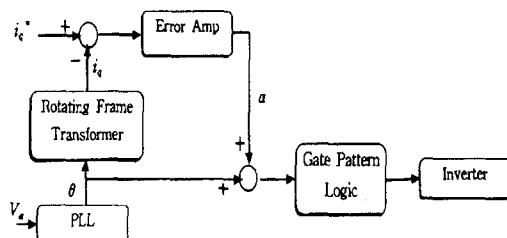


그림 13 PAM 제어블록

Fig. 13 PAM control block diagram

PAM STATCOM에 쓰이는 제어기는 STATCOM이 연결된 시스템의 전압을 유지하기 위해 주로 인버터의 전압각과 시스템 전압각 차이의 조절을 통하여 필요한 무효전력을 발생 혹은 흡수하도록 작동하게 설계된다[8]. 그럼 13에서 θ 는 시스템의 a상 전압위상과 일치된 기준각이고 α 는 시스템의 a상 전압에 대한 인버터 전압의 위상차이다. STATCOM에 입력전류로부터 측정된 무효전류가 기준값 $i_{q_{ref}}$ 과 비교되어 이로부터 위상차 α 를 결정하게 된다. 이 위상차 α 를 토대로 미리 결정되어 있는 게이트 패턴 로직을 이용하여 원하는 STATCOM의 출력전압이 나오도록 인버터 내부의 GTO소자의 스위칭을 한다. 이런 제어방식을 i_q 가 제어변수로 사용되었으므로 PAM STATCOM의 무효전류 제어방식 혹은 무효전력 제어방식이라고 할 수 있다. 그런데 현실적으로 STATCOM은 모션전압을 제어하는 것이 목적이므로 이 제어방식에선 미리 설정되어 있는 시스템의 기준전압 V_{ref} 로부터 우선 $i_{q_{ref}}$ 값이 계산되어야 한다. 그러므로 실제 계통에서 STATCOM을 제어할 때에는 $i_{q_{ref}}$ 값을 제어입력변수로 하는 무효전력 제어방식이 아닌 V_{ref} 값을 제어입력변수로 하는 전압제어방식이 더 바람직하다고 하겠다. 다만, 전압제어 방식의 경우 $i_{q_{ref}}$ 를 V_{ref} 로부터 만들어내는 제어블록이 추가됨으로 무효전력 제어방식보다는 제어응답이 더 느리게 된다[2].

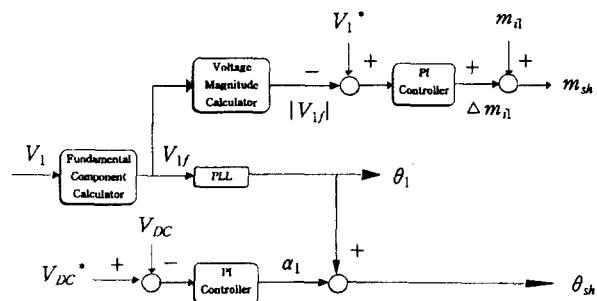


그림 14 PWM 제어블록
Fig. 14 PWM control block diagram

그림 14에 나타난 PWM 방식의 STATCOM에 쓰이는 제어기는 PWM의 특성에 따라 아래 식(1)과 같이 크기와 위상을 동시에 제어할 수 있는 전압출력을 갖는다[6].

$$e = k(m) V_{dc} \sin(\alpha) \quad (1)$$

식(1)에서 보듯이 인버터 전압의 크기 e 가 modulation index m 의 함수이므로 m 을 조정하여 인버터전압의 크기를 직접 제어할 수 있고, 전압 위상 α 를 직접제어 하여 STATCOM이 갖는 손실을 보상할 수 있다. 제어를 위해 필요한 modulation index m 의 값은 기준전압과 측정된 모션전압의 비교를 통하여 구해지고, 전압의 위상 α 는 전력시스

템과 STATCOM사이 유효전력의 교환과 관련 있는 DC 커페시터의 양단전압 크기와 DC 커페시터 기준전압과의 비교를 통해 구해진다. PAM 방식에서 V_{ref} 를 제어입력으로 사용할 땐, 이 값에 상응하는 $i_{q,ref}$ 를 계산하고 이를 다시 측정된 무효전류와 비교해서 시스템 전압을 제어하는 과정을 거쳐야 하지만 PWM 방식에서는 전압을 직접 제어할 수 있으므로 앞서 언급한 것처럼 PWM 방식이 PAM 방식보다 제어가 좀더 간단하고, PWM 방식이 PAM 방식의 STATCOM 보다 좀더 빠른 응답특성을 갖는다.

3. PAM STATCOM/PWM STATCOM 모의

STATCOM을 GTO 3상 인버터 회로를 구성하여 그림 15와 같이 두 계통을 연결하는 선로에 STATCOM을 설치하여 모선 전압을 제어하도록 하였다. 그리고, PAM STATCOM과 PWM STATCOM의 특성과 제어 방식을 비교 분석하기 위하여 동일한 조건하에서 수치 모의 실험을 실행하였다. PAM STATCOM의 제어 방식은 그림 13의 제어회로를 이용하였고 PWM STATCOM은 그림 14의 제어회로를 이용하였다. 수치모의 실험은 ATP를 이용하였다.

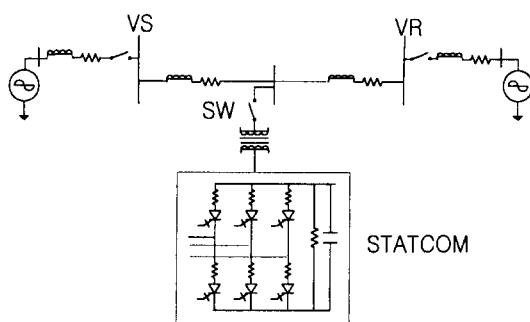


그림 15 모의대상 시스템

Fig. 15 Simulation system

3.1 PAM STATCOM 모의

PAM STATCOM을 전류제어방식으로 제대로 동작하는지를 수치실험을 하였다. 모의는 $i_{q,ref}$ 를 처음 0msec에서 200msec까지 STATCOM을 동작시키지 않는 상태인 0pu값을 갖도록 유지하다가 200msec에서 -1.32pu의 값을 갖도록 변화시킨 후, 300msec에서 다시 0.78pu 값을 갖도록 변화시켰다.

PAM STATCOM은 그림 16에 나타난 것처럼 기준 무효전류값의 변화에 대해 실제 무효전류 i_q 가 잘 추종하고 있다. 여기서 $i_{q,ref}$ 가 음의 값을 가질 때가 무효전력을 보상하는 경우이고, $i_{q,ref}$ 가 양의 값을 가질 때가 무효전력을 흡수하는 경우를 나타낸다. 따라서 $i_{q,ref}$ 가 음수일 때 모선전압이 높아지고, $i_{q,ref}$ 가 양수일 땐 모선전압이 낮아지게 된다.

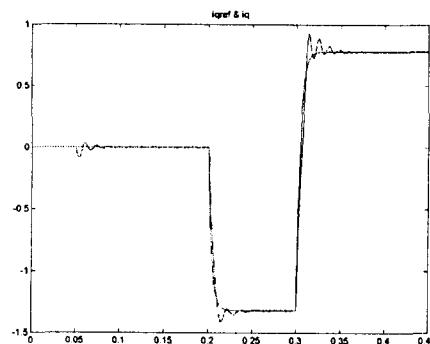


그림 16 기준 무효전류($i_{q,ref}$)의 변화에 따른 STATCOM 무효전류(i_q)의 응답

Fig. 16 The reponse of the i_q on the variation of the $i_{q,ref}$

PAM STATCOM과 PWM STATCOM의 특성을 비교하기 위하여 모선 전압 v_{1a} 가 1.0 pu값을 유지하다가 200msec에서 1.05pu로 변화하고 다시 300msec에서 0.95pu로 변화하는 조건에서 모의실험을 행하였다. 모의 실험의 결과는 그림 17과 18에 나타나있다. 그림 17은 커페시터의 양단전압 Vdc 값 역시 무효전류의 변화에 응하면서 변화하고 있음을 보이고 있다. 그림 18에는 200msec 까지 무효전력을 공급하던 PAM STATCOM이 300msec에서 무효전력을 흡수하는 작동으로 변화할 때, STATCOM의 출력전압, 시스템의 버스전압, STATCOM 입력전류가 나타나 있다. 여기서 STATCOM의 출력전압과 버스전압이 약간의 차이 값을 갖고 있는 것과 무효전력 공급 시에 STATCOM 입력전류가 전압에 비해 위상이 뒤지고 있다가 무효전력을 흡수하게 되자 입력전류가 전압에 비해 위상이 앞서는 것이 나타나 있다.

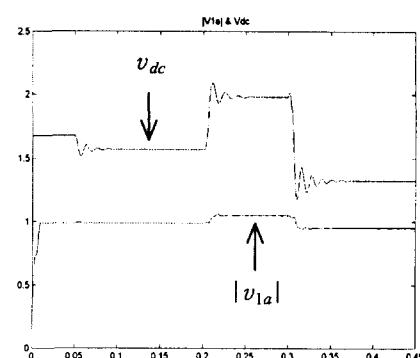


그림 17 기준무효전류($i_{q,ref}$)변화에 따른 모선전압크기($|v_{1a}|$)와 커페시터전압(v_{dc})의 응답

Fig. 17 The responses of $|v_{1a}|$ and v_{dc} on the variation of $i_{q,ref}$

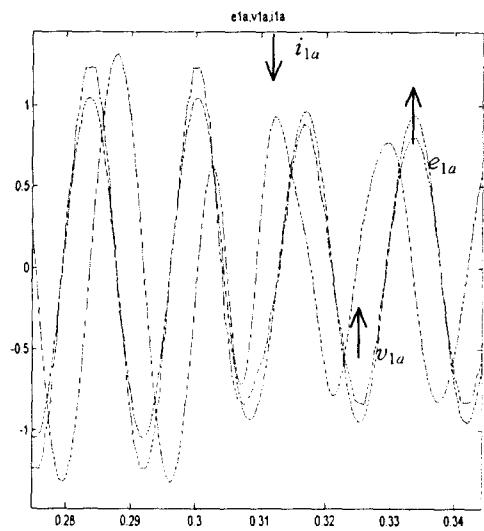


그림 18 기준 무효전류 변화에 따른 STATCOM 출력전압 (e_{1a}), 모선전압(v_{1a}), STATCOM 입력전류 (i_{1a})의 응답

Fig. 18 The responses of e_{1a} , v_{1a} , i_{1a} on the change of i_{qref}

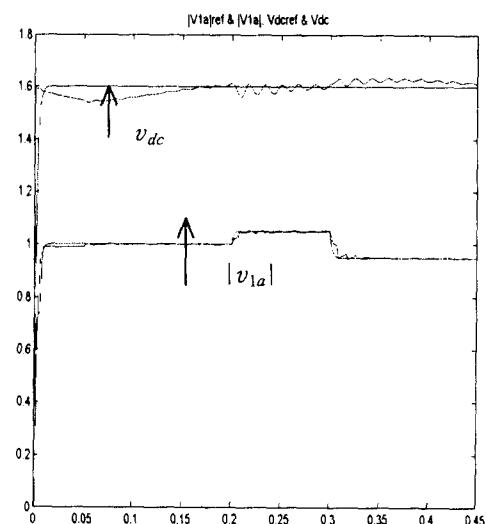


그림 19 기준 모선 전압($|v_{1a}|_{ref}$)의 변화에 따른 모선전압 ($|v_{1a}|$)의 응답과, 기준 커패시터 전압($v_{dc ref}$)의 변화에 따른 커패시터 전압(v_{dc})의 응답

Fig. 19 The response of the $|v_{1a}|$ on the change of $|v_{1a}|_{ref}$ and the response of the v_{dc} on the change of the $v_{dc ref}$.

3.2 PWM STATCOM 모의

PAM STATCOM과의 비교를 위하여 PAM STATCOM에서 모의 실험한 조건과 동일한 조건 하에서 실험을 행하였다. 모의 실험의 결과는 그림 19, 20과 21에 나타나 있다. 그림 19는 기준 모선전압크기 명령($v_{dc ref}$)과 이에 따른 모선전압크기($|v_{1a}|$)와 기준 커패시터 전압($v_{dc ref}$)과 실제 커패시터전압(v_{dc})가 나타나 있다. 모선전압이 기준모선전압의 변화를 잘 추종하고 있음을 보이고 있다. 그림 20에는 기준모선전압의 변화에 상응하는 전압크기 modulation index m 의 변화와 v_{dc} 를 유지하기 위한 modulation index α 의 변화가 나타나 있다. 그림 21에는 200msec까지 무효전력을 공급하던 PWM STATCOM이 300msec에서 무효전력을 흡수하는 작동으로 변화할 때, STATCOM의 출력전압, 시스템의 버스전압, STATCOM 입력전류가 나타나 있다. 여기서 STATCOM의 출력전압과 버스전압이 약간의 차이 값을 갖고 있는 것과 무효전력을 공급 시에 STATCOM 입력전류가 전압에 비해 위상이 뒤지고 있다가 무효전력을 흡수하게 되자 입력전류가 전압에 비해 위상이 앞서는 것이 나타나 있다. 또한 앞의 PAM STATCOM 그림 18과 비교해 볼 때 출력전압에 많은 고조파 성분이 있음을 알 수 있다.

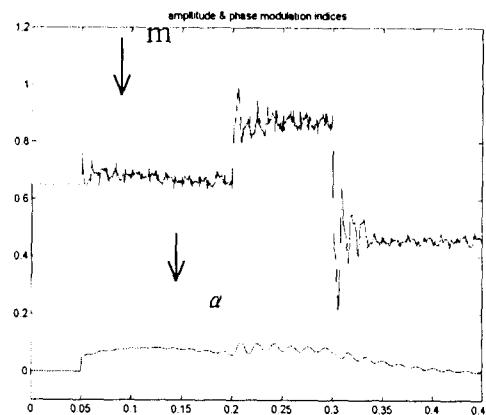


그림 20 PWM 크기변조지수(m), 위상변조지수(α)

Fig. 20 PWM magnitude modulation index (m), phase modulation index(α)

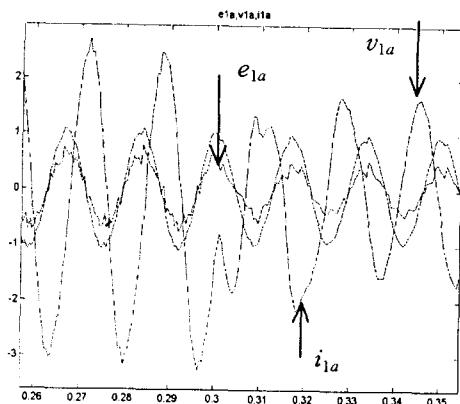


그림 21 기준 모선전압($|v_{1a}|_{ref}$)의 변화에 따른 모선전압(v_{1a}), STATCOM 출력전압(e_{1a}), STATCOM 입력전류(i_{1a})의 응답

Fig. 21 The responses of e_{1a} , v_{1a} , i_{1a} on the change of $|v_{1a}|_{ref}$

PAM STATCOM과 PWM STATCOM의 더욱 정확한 비교를 위하여 그림 17, 그림 19의 모선전압 응답형상을 확대하였다. 앞서 언급한 대로 PWM STATCOM은 PAM STATCOM에 비해 많은 고조파성분이 있는 출력전압을 갖고 있음을 알 수 있다. 한편 제어응답을 비교해 볼 때는 PWM STATCOM이 PAM STATCOM에 비해 약 10msec 정도 빠른 응답을 보이고 있으며 overshoot도 작은 것으로 나타나 있다. PAM STATCOM의 경우 무효전류제어 방식을 사용한 상태이므로 원하는 모선전압크기를 얻기 위해 이에 맞는 기준무효전류를 구하는 제어 블록이 추가되면 응답시간이 더욱 길어질 것이다.

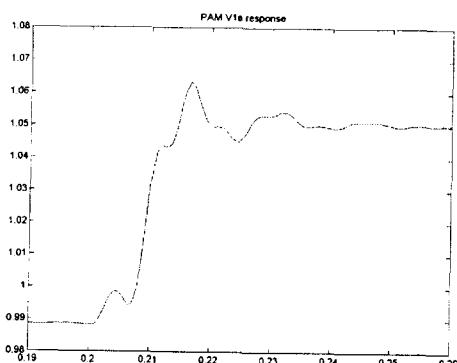


그림 22 PAM STATCOM의 제어응답

Fig. 22 The control response of the PAM STATCOM

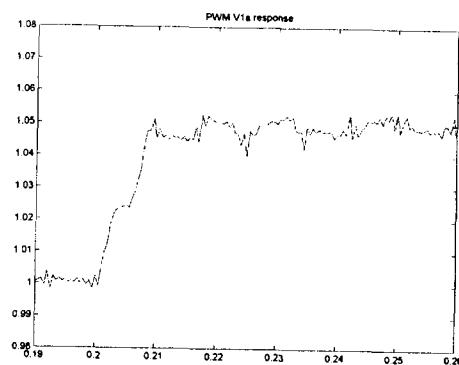


그림 23 PWM STATCOM의 제어응답

Fig. 23 The control response of the PWM STATCOM

3. 결 론

본 논문에서는 PAM방식 STATCOM과 PWM방식 STATCOM의 특성을 살펴보고, 각 방식의 STATCOM에 사용되는 제어방식을 비교해 보았으며, 두 방식의 STATCOM을 모의하여 보았다. PAM STATCOM의 제어방식 중 무효전력 제어방식과 전압 제어방식의 제어응답을 고려해 볼 때, 무효전력 제어방식의 제어응답이 추가적인 제어 블록이 필요한 전압 제어방식 보다 빠르다고 할 수 있다. 실제 STATCOM의 주된 기능이 모선의 전압을 원하는 값으로 유지하는 것이라고 할 때 STATCOM의 제어 측면에선 무효전력 제어방식보다는 전압제어 방식이 운전자에게 편리하다고 할 것이다. PWM STATCOM은 제어명령으로 모선전압을 직접 사용하여 제어응답이 무효전류 제어방식의 PAM STATCOM 보다 빠르게 나타났다. PAM 방식은 특수한 자기회로가 필요하므로 크기가 비교적 커서 설치장소에 제한을 받는다. 하지만, 스위칭손실이 작고 출력전압에 고조파성분이 비교적 적다. PWM 방식은 비교적 제어가 간단하고 용이하며, PAM방식에 비하면 장소의 제약을 덜 받는다고 할 수 있다. 하지만 많은 스위칭횟수로 인해 스위칭손실이 비교적 크고, 출력전압에 고조파성분이 많기 때문에 필터가 필수적이다. 아직까지는 PWM 방식의 STATCOM은 전력전자 소자의 한계로 구현하는데 있어서 제한을 받기 때문에 PAM 방식의 STATCOM이 주로 연구되고 실험 제작되어 왔다. 하지만 앞으로 전력전자소자 기술이 발달하면 PWM 방식 STATCOM이 갖는 장점도 있으므로 PWM 방식 STATCOM에 대한 연구나 실험도 활기를 떨 것으로 여겨진다.

참 고 문 헌

- [1] L.Gyugyi, N.G.Hingorani, P.R.Nannery, N.Tai, "Advanced static var compensator using gate turn-off thyristors for utility applications", Cigre paper No.23-203, 1990.

- [2] C.Schauder,M.Gernhardt,E.Stacey,T.Lemak,L.Gyugyi,
T.W.Cease, A.Edris, "Operation of ± 100 MVAR TVA
STATCON", IEEE Trans. on PWD, Vol.12, No.4,
October 1997.
- [3] J.B.Ekanayake, N.Jenkins, "A three-level Advanced
Static VAr Compensator", IEEE Trans. on PWD,
Vol.11, No.1, Jan. 1996.
- [4] R.W.Menzies, Yiping Zhuang, "Advanced Static
Compensator Using A Multilevel GTO Thyristor",
IEEE Trans. on PWD, Vol.10, No.2, April 1995.
- [5] 노의철, 정규남, 최남섭, "전력전자공학", 문운당.
- [6] J.Y.Liu, Y.H.Song, A.M.Foss, "Digital simulation of
the PWM UPFC using EMTP", Proceedings, IEE
sixth international conference on AC and DC
transmission, April 29 - May 3, 1996.
- [7] X.Lombard, P.G.Therond, "Control of Unified Power
Flow Controller: comparison of methods on the basis
of a detailed numerical model", IEEE Trans. on PWS,
Vol.12, No.2, Jan. 1997.
- [8] C.Schauder, H.Metha, "Vector analysis and control of
advanced static VAR compensators", IEE
Proceedings-C, Vol.140, No.4, July 1993.

저 자 소 개



김 선 호 (金 鮮 漢)

1970년 8월 10일 생. 1998년 서울대 공대
전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기
공학부 졸업(석사)

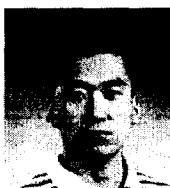


이 송 근 (李 松 根)

1962년 8월 29일 생. 1987년 상파울로 공대
전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원
전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원
전기공학과 졸업(공박). 1997년~현재 전
주대 전자매체공학부 전임강사

Tel : 063-220-2723

E-mail : songklee@jeonju.ac.kr



원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 전기공
학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학부
졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학부
박사과정



문 승 일 (文 承 逸)

1961년 2월 1일 생. 1985년 서울대 공대
전기공학과 졸업. 1989년 미국 The Ohio
State University 졸업(석사). 1992년 동
대학원 졸업(공박). 1993년~1997년 전북
대 전기공학과 교수. 1997년~현재 서울대
전기공학부 조교수

Tel : 880-1821



한 학 근 (韓 學 根)

1958년 8월 26일 생. 1982년 서울대 공대 전
기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학
과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학
부 졸업(공박). 1982~1988년 생산기술연구
원. 현재 동양공업전문대 전기전자통신공학
부 부교수