

STATCOM의 특성해석을 위한 동적모델 고찰

김선호*, 원동준*, 한학근**, 이송근***, 문승일*

*서울대학교 공과대학 전기공학부, **동양공업전문대학 전기전자통신공학부, ***전주대학교 이공과대학 전기공학부

Dynamic Model Study for the Analysis of the STATCOM Characteristics

S.H.Kim*, D.J.Won*, H.G.Han**, S.K.Lee***, S.I.Moon*

*Sch. of E.E. Seoul National University, **Sch. of E.E. DongYang Technical College,

***Dep. of E.E. Jeon-Ju University.

Abstract - Recently Advanced Static Var Compensators(ASVC) or STATIC Synchronous COMpesator(STATCOM) has been considered as a next generation reactive power controller.[2] STATCOM is a voltage source inverter(VSI) based 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.[1] This paper compares the PAM STATCOM with PWM STATCOM. The characteristics and the control method of each model is analyzed. And the simulation of STATCOMs based on the above two methods was presented.

은 변압기를 통해 전력시스템에 병렬로 연결되어 근본적으로 회전동기보상기와 같은 방식으로 무효전력을 흡수 또는 공급한다. 하지만 회전동기조상기의 기계적인 관성이나 긴 여자시간은 없다.[3] STATCOM에서 제어되는 출력전압은 무효전력을 공급할 경우에는 시스템전압과 상은 일치하고 크기는 조금 크게 유지되고, 무효전력을 흡수하는 경우에는 역시 상은 시스템전압과 일치시키되 그 크기는 선로전압의 크기보다 조금 작게 유지된다. 이 때 STATCOM에서 발생하는 전력 손실은 전력시스템으로부터 유효전력을 받아서 보상한다.[5]

1. 서론

전력시스템에서 어느 특정 버스의 전압크기를 조정하기 위해서는 무효전력을 공급해 주는 방법이 널리 쓰여왔다. 과거에 사용되던 기기들은 동기조상기, 기계적 스위치를 단 커패시터와 인덕터, 그리고 포화리액터 등이 일반적이었고, 60년대 후반부터는 싸이리스터에 의해 조절되는 리액터(TCR) 또는 싸이리스터 스위치가 달린 커패시터(TSC)가 사용되어 왔다. 최근에 와서는 전압원인버터를 사용한 STATCOM이 제안되어 많은 연구가 진행되고 있다. STATCOM이 기존의 무효전력 보상기들에 대해 갖는 가장 큰 장점은 기기의 크기가 기존의 것보다 훨씬 작기 때문에 설치비용을 감소시킬 수 있다는 것과 시스템에는 더 큰 유연성을 줄 수 있는 것이라고 할 수 있다.[2] 이제까지 제안된 STATCOM을 실현하는 방법들을 살펴보면 주로 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 두가지 방식의 STATCOM 모델들이 갖는 특성을 검토하고, 두가지 방식에서 각각 쓰이는 제어방법을 비교 분석했으며, 각 방식으로 STATCOM을 구성한 후 모의한 결과를 살펴보았다.

2. 특성 및 제어방식 비교

2.1 STATCOM

STATCOM은 전압원 인버터와 직류커패시터로 구성되어 있는 차세대 무효전력 보상장치라고 할 수 있다. STATCOM은 근본적으로 coupling reactance 뒤에 있는 교류전압으로 이해될 수 있으며, 이 교류전압은 직류 커패시터에 의해 작동하는 GTO 싸이리스터 인버터에 의해 구현된다. 그림1.에 나와있듯이 STATCOM

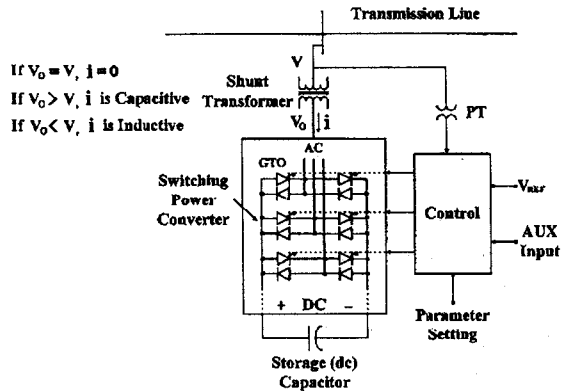


그림1. STATCOM

STATCOM의 무효출력전류에 대한 시스템 전압의 특성을 기존 SVC(Static Var Compensator)의 특성과 비교해 보면(그림2) 기존 SVC는 최대 출력에선 제어되지 않는 커패시터뱅크가 되기 때문에 전류가 전압에 비례하여 감소하지만 STATCOM은 약 0.15 per unit정도의 시스템 전압까지 최대한의 용량성 전류를 공급할 수 있음을 보이고 있다.[2] 이것은 STATCOM이 기존의 SVC에 비해 더욱 넓은 작동범위를 갖고 있으므로 전력시스템을 좀더 유연하게 해 줄 수 있음을 보인다.

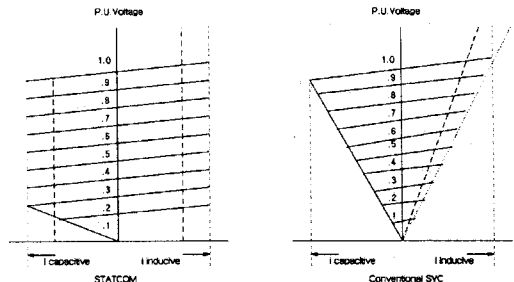


그림2. STATCOM의 전압-전류 특성

2.2 PAM방식 STATCOM과 PWM방식 STATCOM의 특성

STATCOM을 구현하는 방식은 앞서 언급한 대로 PAM방식과 PWM방식이 있다. 이는 STATCOM의 인버터에서 나오는 전압을 싸인파로 형성하는 방식의 차이라고 할 수 있다. PAM 방식에서는 DC 커패시터의 양단 전압을 띄고 있는 인버터내의 GTO 소자들을 적절한 스위칭패턴과 자기회로를 이용하여 싸인파에 가까운 다중펄스로 형성된 출력전압을 만든다. 따라서 PAM방식은 다중펄스방식이라고도 말할 수 있다.[4] PAM 방식에선 다중펄스 출력전압이기 때문에, 고조파의 발생이 상대적으로 작고 운전 손실도 작다.[6] 다만 이 방식은 다중펄스 방식 인버터의 자기회로로 출력전압을 구성할 때 필요한 복잡한 형태의 자기회로가 있어서 설치시 비교적 많은 공간과 비용이 든다.

PWM방식은 일반적으로 기준 전압파형을 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.[4] 하지만 PWM STATCOM은 많은 스위칭으로 인해 비교적 손실이 PAM STATCOM 보다는 많고[6], 아직까진 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.

[표1] PAM/PWM 방식 STATCOM 특성비교

| | 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 |

2.3 제어 방식 비교.

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.[1] 그림3에서 θ 는 시스템의 a상전압 위상과 일치된 기준각이고 α 는 시스템의 a상전압에 대한 인버터 전압의 위상차이다. 측정된 무효전류가 기준값 i_{qm} 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 전압을 제어하는 것이 목적이므로 우선 i_{qm} 값이 시스템의 기준전압 V_{ref} 로부터 계산되어야 한다. 그러므로 실질적인 제어에 있어서는 i_{qm} 값을 제어입력으로하는 무효전력 제어방식

이 아닌 V_{ref} 값을 제어입력으로하는 전압제어방식이 더 바람직하다고 하였다. 다만, 전압제어 방식의 경우 i_{qm} 를 V_{ref} 로부터 만들어내는 제어블록이 추가됨으로 무효전력 제어방식보다는 제어응답이 더 느리게 된다.[3]

PWM 방식의 STATCOM에 쓰이는 제어기는 PWM의 특성에 따라 아래식(1)과 같이 인버터 출력전압의 크기와 위상을 동시에 제어할 수 있도록 설계된다.[4]

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

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 직접 제어하여 STATCOM이 갖는 손실을 보상할 수 있다. 제어를 위해 필요한 modulation index m 의 값은 기준전압과 측정된 모션전압의 비교를 통하여 구해지고, 전압의 위상 α 는 전력시스템과 STATCOM사이 유효전력의 교환과 관련있는 DC 커패시터의 양단전압 크기와 DC 커패시터 기준전압과의 비교를 통해 구해진다. PAM 방식에서 V_{ref} 를 제어입력으로 사용할 때, 이 값에 상응하는 i_{qref} 를 계산하고 이를 다시 측정된 무효전류와 비교해서 시스템 전압을 제어하는 과정을 거쳐야 하지만 PWM 방식에서는 전압을 직접제어할 수 있으므로 앞서 언급한 것처럼 PWM 방식이 PAM 방식보다 제어가 좀더 간단하고, PWM 방식이 PAM 방식의 STATCOM 보다 좀더 빠른 응답특성을 갖는다.

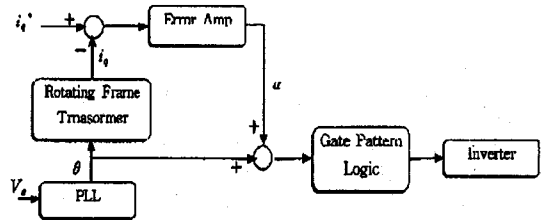


그림3.PAM control block diagram

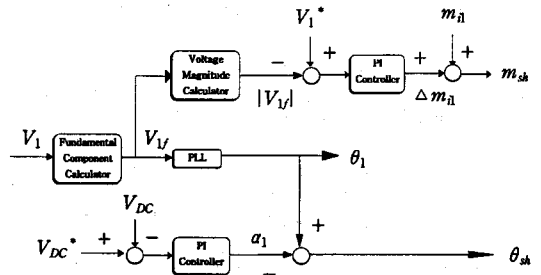


그림4.PWM control block diagram

3. PAM STATCOM/PWM STATCOM 모의

3.1 PAM STATCOM

여기서는 PAM STATCOM의 전류제어방식에 의한 모의를 하였다. 전류제어 방식은 앞서 언급한 대로 기준값 i_{qm} 를 명령으로 하여 이를 통해 전압을 제어하는 방식이다. i_{qm} 가 처음에는 STATCOM을 동작시키지 않는 상태인 0p.u.값을 갖도록 유지하다가 200msec에서 -1p.u.의 값을 갖도록 변화시킨 후, 300msec에서 다

시 1p.u 값을 갖도록 변화시켰다. 모의에서 $i_{q_{nw}}$ 가 음의 값을 갖을 때가 무효전력을 보상하는 경우이고, $i_{q_{nw}}$ 가 양의 값을 갖을 때가 무효전력을 흡수하는 경우를 나타낸다. 따라서 $i_{q_{nw}}$ 가 음수일 때 모션전압이 조금 높아지고, $i_{q_{nw}}$ 가 양수일 땐 모션전압이 조금 낮아지는 것을 볼 수 있다. STATCOM의 출력 무효전류 i_q 는 기준무효전류 $i_{q_{nw}}$ 의 변화에 약 15msec의 시지연을 갖는 응답을 보이고 있다.

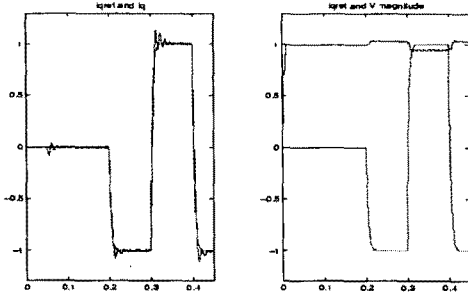


그림4. PAM STATCOM 모의

3.2 PWM STATCOM

처음에는 제어명령 V_{ref} 를 1p.u.로 유지하다가 200msec에서 1.05p.u.로 변화시키고, 다시 300msec에서 0.95p.u.가 되도록 변화시켰다. 모션전압 V 는 제어명령 V_{ref} 를 약 10msec의 시지연을 갖고 추종하는 것을 보이고 있으며, 제어명령 V_{ref} 의 변화에 의해 modulation index m 도 이에 맞게 변화함을 보이고 있다.

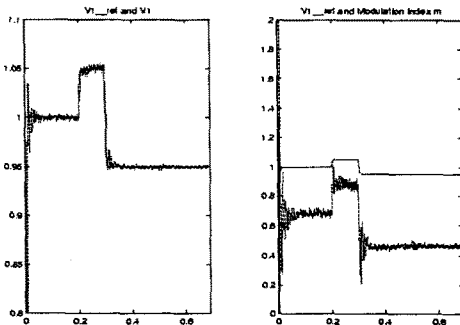


그림5. PWM STATCOM 모의

두 STATCOM의 모의에서 PAM STATCOM의 경우 무효전력제어를 사용한 명령추종에 약 15msec의 시지연을 보이고 있는데, 전압제어를 하게 되면 시지연이 이보다 더욱 늘어날 것이므로, 기준 모션전압을 직접 제어 입력으로 할 경우 PWM STATCOM이 PAM STATCOM 보다 제어응답특성이 빠르다고 하겠다.

3. 결 론

본 논문에서는 PAM방식 STATCOM과 PWM방식 STATCOM의 특성을 살펴보고, 각 방식의 STATCOM에 사용되는 제어방식을 비교해 보았으며, 두방식의 STATCOM을 모의하여 보았다. PAM 방식은 특수한

자기회로가 필요하므로 크기가 비교적 커서 설치장소에 제한을 받는다. 하지만, 스위칭손실이 작고 출력전압에 고조파성분이 비교적 적다. PWM 방식은 비교적 제어 가 간단하고 용이하며, PAM방식에 비하면 장소의 제약을 덜 받는다고 할 수 있다 하지만 많은 스위칭횟수로 인해 스위칭손실이 비교적 크고, 출력전압에 고조파성분이 많기 때문에 필터가 필수적이다. 아직까진 PWM 방식의 STATCOM은 전력전자 소자의 한계로 구현하는데 있어서 제한을 받기 때문에 PAM 방식의 STATCOM이 주로 연구되고 실험제작되어 왔다. 하지만 앞으로 전력전자소자 기술이 발달하면 PWM 방식 STATCOM이 갖는 장점도 있으므로 PWM 방식 STATCOM에 대한 연구나 실험도 활기를 띌 것으로 여겨진다.

(참 고 문 헌)

- [1] C.Schauder, H.Metha, "Vector analysis and control of advanced static VAR compensators", IEE Proceedings-C, Vol.140, No.4, July 1993
- [2] 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
- [3] 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
- [4] J.Y.Liu, Y.H.Song, A.M.Foss, "Digital simulation of the PWM UPFC using EMTF", Proceedings, IEE sixth international conference on AC and DC transmission, April 29 - May 3, 1996
- [5] J.B.Ekanayake, N.Jenkins, "A three-level Advanced Static VAR Compensator", IEEE Trans. on PWD, Vol.11, No.1, Jan. 1996
- [6] 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