

HVDC 시스템에서 무효전력 보상 특성

양병모, 유병우, 박종광, 김찬기, 이형한
전력연구원

Characteristics of Reactive Power Compensation in HVDC System

Byeongmo Yang, Byeongwoo Ryu, Jongkwang Park, Chanki Kim, Hyounghan Lee
KEPRI

ABSTRACT

본 논문은 사이리스터를 이용한 HVDC 시스템에서 발생하는 무효전력보상에 대한 특성을 무효전력 발생원인과 보상방법에 대하여 고찰하고자 하였다. HVDC 시스템은 무효전력을 컨버터의 제어를 통하여 한정적으로 보상할 수 있으며, 고조파 제거를 위하여 설계하는 교류필터의 커패시터를 이용하여 무효전력보상기능을 추가하고 있다. 하지만 이러한 방법으로는 완전하게 무효전력을 보상할 수 없으므로 추가적인 무효전력 보상장치를 설계하여야 한다. 그러므로 본 논문에서는 현재 제주-해남에 설치 되어있는 HVDC 시스템을 대상으로 무효전력 보상에 대한 시뮬레이션을 하였다. 제주 인버터단의 특성을 고려하여 무효전력보상을 위한 커패시터와 동기 조상기의 Hybrid형 방법에 대하여 동적 특성을 분석하였으며 논문에서 사용된 방법은 PSCAD/EMTDC를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

사이리스터를 사용하는 HVDC 변환소(정류기와 인버터)는 직류전력 전송량의 유효분 전력의 대략 60%에 해당하는 진상 무효 전력을 교류계통으로부터 흡수한다. 이러한 무효전력의 소비는 HVDC 시스템 용량이 커짐에 따라 더 많은 문제를 유발하는데, 무효전력을 보상하기 위해서 HVDC 연결단에 콘덴서, 동기조상기(Synchronous Condenser), 정지형 무효 전력 보상기(SVC : Static Var Compensator) 그리고 STATCOM(Static Compensator)과 같은 무효전력 보상장치의 설치를 한다.^{[1][2]}

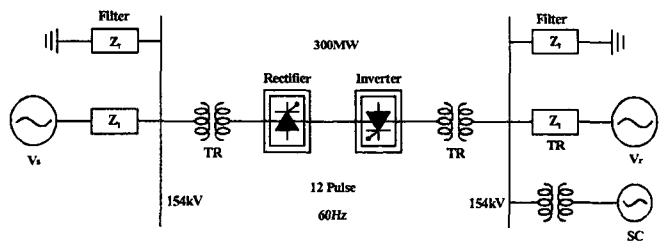


그림 1 HVDC 시스템의 개략도

1. 서 론

현재 제주도 전력의 약 50%를 공급 해주고 있는 제주-해남 간 직류송전을 위한 HVDC 연계설비는 제주 지역의 부하증가와 더불어 그 중요도가 크게 대두되고 있다. 그림 1에서 나타낸 것과 같이 HVDC 시스템은 12펄스 사이리스터 컨버터를 사용하여 구성하고 있다. HVDC 시스템은 직류송전에 대한 제어를 위하여 사이리스터의 점화각(a)의 제어를 하여야 하기 때문에 컨버터의 교류 전류의 위상은 항상 전압에 뒤진다. 그래서 HVDC 컨버터는 지연된 전류를 흡수하기 위한 무효전력이 반드시 필요하다. 그림 2는 HVDC 시스템의 유효전력 백터도를 보여주고 있으며, 컨버터 양단에서 무효전력이 소비되고 있음을 알 수 있다.

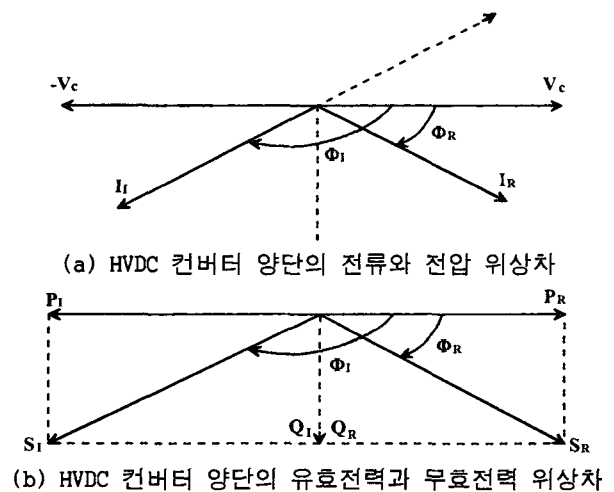


그림 2 HVDC 시스템의 전류·전력 백터도

2. HVDC 시스템에서의 무효전력

1 HVDC 시스템에서의 무효전력발생

HVDC 시스템은 정상상태에서 사이리스터 컨버터에 의한 무효전력 발생량은 상대적으로 ac & dc 파라메타와 변수에 따라 다르지만 일반적인 사이리스터 컨버터 점호각의 제어를 가정하면 식 (1)과 같이 단순화시킬 수 있다.^[1]

$$V_{do} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} nTV_{ac}$$

$$P = V_{do} I_d \frac{(\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu))}{2}$$

$$Q = V_{do} I_d \left(\frac{\sin 2\alpha - \sin(2(\alpha + \mu)) + 2\mu}{4(\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu))} \right) \quad (1)$$

여기서 V_{do} 는 무부하 직류전압
 α 는 사이리스터 점호각
 μ 는 사이리스터 중첩각

그림 3은 일반적으로 장거리 직류송전의 HVDC 시스템에서 소모되는 무효전력(Qdc)을 유효전력(Pdc)의 함수로 나타내고 있는 특성곡선이다. 즉, 직류전압(Vdc)은 선로 손실을 줄이기 위하여 가능한 높은 정격전압에서 유지되도록 하고 직류전압이 일정하기 때문에 전력전송은 직류전류에 의하여 제어된다. 결과적으로 무효전력은 유효전력에 거의 선형적(굵은 선)으로 변동한다.

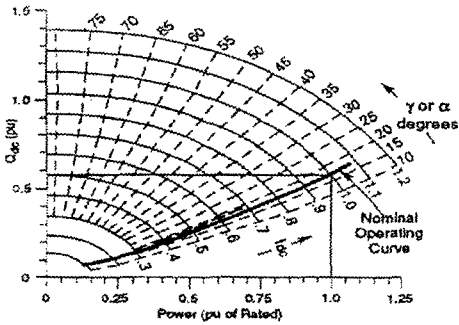
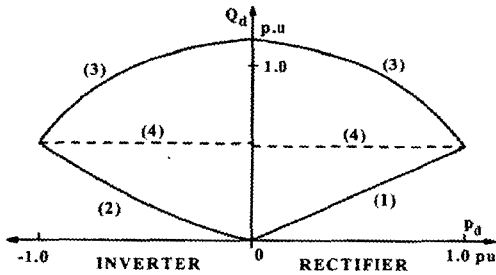


그림 3 HVDC 시스템의 유효·무효전력 특성 곡선



- (1) 정전압 제어 (2) 정전류 제어
 (3) 소호각(λ) 제어 (4) 무효전력 제어

그림 4 HVDC 시스템의 전력 제어 방법

2.2 HVDC 시스템의 무효전력 제어

HVDC 시스템에서 흡수되는 무효전력은 그림 4에서 보듯이 사이리스터 컨버터 제어의 방법에 따라 다르게 제어할 수 있다 곡선 (1), (2), 그리고 (3)는 대부분의 HVDC 시스템에서 적용하고 있는 정상상태의 운전 특성을 보여주고 있다. 점선 (4)는 HVDC 시스템에서 교류와 직류계통의 무효전력을 제어하기 위한 부가적인 설계 방법으로 교류계통의 단자 전압을 제어하기 위하여 교류필터를 부하의 크기에 따라 스위칭 한다. 무효전력보상을 위한 무효전력 운전제어 모드는 직류 전압을 감소시키고 전류를 증가함으로써 전력을 일정하게 유지하지만 직류전압을 감소시키기 때문에 밸브와 서지 어레스터에 전압 스트레스가 증가하는 단점이 있다. 교류계통 전압에 따른 HVDC 시스템의 무효전력 제어 특성은 HVDC 시스템이 정전력 운전모드로 운전되고 있다고 가정하였을 경우 갑작스럽게 전압의 상승하면 전류와 소호각이 상승하여 정전력을 유지하며, 정전류 운전 모드인 경우에는 소호각이 상승한다. 결국 HVDC 시스템은 어느 운전모드로 운전 하더라도 교류전압의 상승에 따른 무효전력 제어를 하게 되는 것이다.

2.3 교류필터의 무효전력 보상

HVDC 시스템에서 교류필터는 컨버터의 12 펄스 사이리스터로 인하여 발생하는 11, 13, 23, 25, ...차의 고조파를 제거하기 위하여 11, 13차의 DT(Double Tuned)필터와 23차 이상의 고조파제거를 위한 HP(High Pass)필터를 사용해야한다. 이러한 필터를 설계할 때에 경제성을 고려하여 필터의 커패시터를 이용한 무효전력보상 기능을 추가하고 있다. 그림 5는 무효전력 보상을 고려한 교류필터의 설계를 나타내고 있다. 그림 5의 필터회로를 기초로 하여 다음과 같이 무효전력 보상을 위한 설계를 한다.

1) HF의 설계

23차 이상의 고조파를 제거하고 무효전력을 보상하기 위한 필터의 설계를 위하여 (2)와 같은 수식을 이용한다.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{n_T^2 V_{Rated}^2}{[n_T^2 - 1] MVA_{Rated}}$$

$$X_L = \omega L = \frac{X_C}{n_T^2}$$

$$R_{HP} = Q_{HP} * n_T * X_L \quad (2)$$

여기서 n_T 는 Tuned frequency

Q_{HP} 는 Degree of damping

2) DTF의 설계

HVDC 시스템에서 발생하는 고조파 중에서 주고조파인 11차와 13차의 고조파를 제거하고 무효전력을 보상하기 위한 필터를 식 (3)과 같은 과정을 통하여 설계한다.

$$MVA_{TOTAL} = MVA_1 + MVA_2$$

$n_1 = 1^{st}$ tuned harmonic, $n_2 = 2^{nd}$ tuned harmonic

$$\alpha = \frac{MVA_1}{MVA_2} \quad X = \frac{V_{Rated}^2}{MVA_{TOTAL}} \quad S_1 = \frac{MVA_1}{n_1^2 - 1} \quad S_2 = \frac{1}{n_2^2 - 1}$$

$$n_0^2 = (an_2^2 S_2 + (1-\alpha)n_1^2 S_1) / (\alpha^* S_2 + (1-\alpha)S_1)$$

$$n_X^2 = \frac{n_1^2 n_2^2}{n_0^2}, \quad n_a^2 = \frac{(n_1^2 + n_2^2 + n_X^2)}{n_0^2} - 1$$

$$S = n_X^2 - 1 - \left(\frac{n_a^2 n_0^2}{n_0^2 - 1}\right), \quad S = X/S$$

$$X_{L1} = S \quad X_{L2} = n_a^2 S \quad X_{C1} = n_X^2 S \quad X_{C2} = n_a^2 n_0^2 S \quad (3)$$

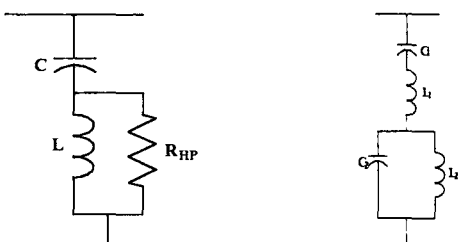
3. HVDC 시스템의 무효전력보상 장치

3.1 HVDC 시스템에서 무효전력 보상

HVDC 시스템에서 소비되는 무효전력은 유효전력의 약 60%로 일정부분은 교류필터를 통하여 보상을 하고 있다. 그러나 교류필터의 무효전력 설계는 경제성 및 필터의 고조파 제거 성능을 고려하여 추가적인 무효전력 보상설비가 교류계통에서 설치되어야 한다. 무효전력보상 설비는 그림 6에서 보듯이 3가지 방법이 있을 수 있다.^{[3][4]}

- 1) 고정 커패시터
- 2) 동기 조상기
- 3) 정지형 무효 보상장치

고정 커패시터의 무효전력 보상 방법은 교류계통이 강한, 즉 단락계통용량이 큰 계통에서 적용되고 있으며 단락계통용량이 작을 때에는 무효전력 보상과 계통강화의 두 가지 목적으로 동기 조상기가 사용된다. 동기조상기는 차과도 시간영역에서 짧은 시간의 전압 안정도를 유지 시킬 수 있으며 HVDC 단자 근처에서 발생한 고장으로 갑작스럽게 직류단의 전력전송이 끊어질 때 사이리스터 컨버터의 과다한 무효전력 공급으로 인하여 교류시스템에서 발생하는 전압 상승을 저감시킬 수가 있다.



(a)HF(High Pass Filter) (b)DTF(Double Tuned Filter)
그림 5 HVDC 시스템의 교류필터

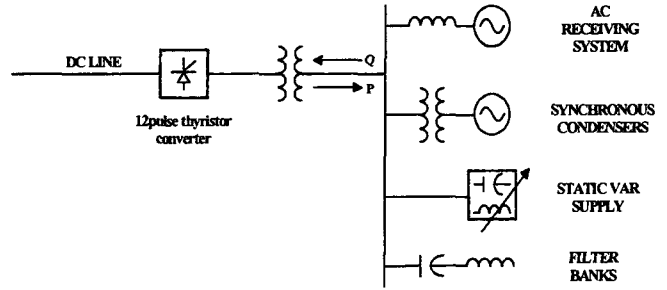


그림 6 HVDC 시스템의 무효전력 보상 설비

표 1 무효전력 보상장치 비교

	Response Time	First Peak TOV	용량	경제성
S.C	느림	보통	대용량	비싼편
SVC	보통	높음	중용량	중간
S.C+SVC	보통	보통	-	-
STATCOM	빠름	낮음	소용량	보통

정지형 무효전력 보상장치는 STATCOM과 SVC가 있다. 표 1은 STATCOM과 동기조상기(SC), SVC와 이것들의 조합에 의한 장단점을 비교한 표이다. 표1에서 보는 바와 같이 동기조상기는 과전압을 억제하는 장점과 발전력이 없는 계통에서 Black Start를 할 수 있다는 장점 때문에 아직도 HVDC 시스템의 필수적인 보조 설비로 이용되고 있다. SVC는 콘덴서 뱅크를 순차적으로 스위칭하는 TSC(Thyristor Switched Capacitor)와 리액터의 전류를 제어하는 TCR(Thyristor Controlled Regulator)을 조합한 설비로써 Peak 과전압을 제어할 수 없다는 단점에도 불구하고 낮은 가격과 빠른 속응성 때문에 많이 사용되어지고 있으며 동기조상기와 결합해서 사용할 경우에는 동기조상기의 과전압 억제 기능과 SVC의 빠른 속응성을 가질 수 있기 때문에 상당히 매력 있는 대안으로 검토되고 있다. STATCOM은 전력 전자기술의 발전에 따라 최근에 개발/연구되고 있는 설비로써 빠른 속응성과 낮은 과전압을 가지지만 아직 기술이 검증되지 않았고 STATCOM에 장착되는 GTO나 IGBT를 직렬로 구동하고 고속으로 스위칭 해야 하기 때문에 생기는 문제점이 아직 명확하지 않은 것이 단점이며 SVC나 동기조상기에 비해 대용량 설계가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

TSC(Thyristor Switched Capacitor)와 리액터의 전류를 제어하는 TCR(Thyristor Controlled Regulator)을 조합한 설비로써 Peak 과전압을 제어할 수 없다는 단점에도 불구하고 낮은 가격과 빠른 속응성 때문에 많이 사용되어지고 있으며 동기조상기와 결합해서 사용할 경우에는 동기조상기의 과전

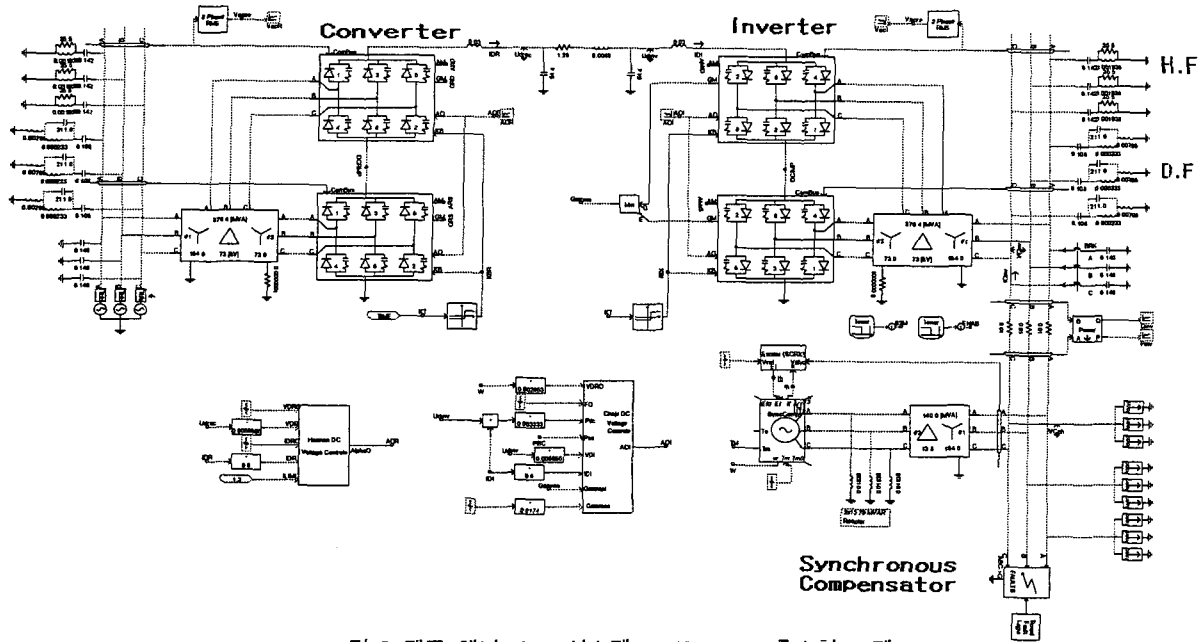


그림 7 제주-해남 HVDC 시스템 PSCAD/EMTDC 축소형 모델

압 억제 기능과 SVC의 빠른 속응성을 가질 수 있기 때문에 상당히 매력 있는 대안으로 검토되고 있다.

STATCOM은 전력 전자기술의 발전에 따라 최근에 개발/연구되고 있는 설비로써 빠른 속응성과 낮은 과전압을 가지지만 아직 기술이 검증되지 않았고 STATCOM에 장착되는 GTO나 IGBT를 직렬로 구동하고 고속으로 스위칭 해야 하기 때문에 생기는 문제점이 아직 명확하지 않은 것이 단점이며 SVC나 동기조상기에 비해 대용량 설계가 어렵다는 단점을 가지고 있다.

4. 제주-해남 HVDC 시스템의 무효전력 보상을 위한 시뮬레이션^[4-8]

본 논문에서는 무효전력 보상을 위한 특성 시뮬레이션을 위하여 실제로 운전되고 있는 제주-해남 HVDC 시스템을 시뮬레이션 대상으로 하였으며 시뮬레이션 방법은 PSCAD/EMTDC 과도 프로그램을 이용한 제주-해남 HVDC 시스템의 축소형 모델을 그림 7과 같이 사용하였다.

4.1 HVDC 시스템에서 무효전력보상 모의

그림 8은 HVDC 시스템의 인버터 단에서 고정 커패시터가 스위칭 open할 때의 무효전력 제어 특성 결과를 보여 주고 있다. 커패시터 스위칭으로 그림 8 (a)에서 ac 전압이 하강하며 이로 인한 그림 8 (c)에서 무효전력 부족으로 그림 8 (b)에서 인버터단의 점호각(AOI)은 증가(즉, 소호각이 감소)하고 그림 8 (d)에서 보듯이 동기 조상기의 무

효전력 보상으로 HVDC 시스템은 다시 고정 커패시터 스위치 open 하기 전의 점호각 상태로 복귀되었다. 그림 9는 HVDC 시스템의 인버터 단에서 1상고장 시에 무효전력 제어 특성 결과를 보여 주고 있다. 인버터 단에서 교류 1상고장으로 그림 9 (a)에서 교류전압이 과도현상을 보이고 있으며 그림 9 (c)에서는 사고 시에 교류전압의 하강에 따른 유효전력의 감소와 무효전력의 상승이 발생하여 그림 9 (b)에서 나타난 바와 같이 인버터단의 점호각(AOI)은 감소(즉, 소호각이 증가)하고 컨버터의 점호각(AOR)은 증가한다. 이 때 그림 9 (d)의 동기 조상기의 무효전력 보상은 능동적으로 이루어져서 무효전력의 흡수 및 공급에 관한 동작을 수행하여 교류 계통의 과전압을 줄이고 있다는 사실을 확인할 수 있다.

5. 결 론

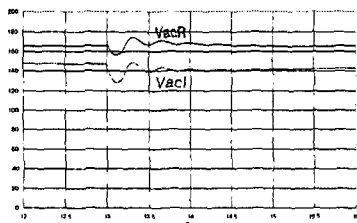
HVDC 시스템의 무효전력 보상 특성을 분석하기 위하여 HVDC 시스템의 무효전력 보상 방법은 아래와 같이 요약할 수 있다.

1. 사이리스터를 사용하는 HVDC 변환소(정류기와 인버터)는 DC전력 전송량의 유효분 전력의 대략 60%에 해당하는 진상 무효전력을 교류 계통으로부터 흡수한다.
2. HVDC 시스템은 한정적으로 무효전력제어를 할 수 있다.
3. HVDC 시스템에서 고조파제거를 위한 필수적인 교류 필터 설계 시에 경제성을 고려하여 무효전력보상 기능을 추가하고 있다.

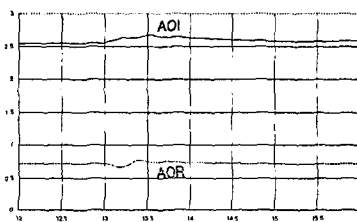
4. HVDC 시스템에서 무효전력보상 설비는 고정 커패시터, 동기 조상기, 정지형 무효 보상장치 등이 각각의 계통 필요조건에 따라 설치 운영 되고 있다.
5. 제주-해남 HVDC 시스템의 PSACD/EMTDC 축소형 모델을 이용한 적용을 통하여 제주 인버터단의 경제성과 약한 계통의 단점을 보완 하기 위한 고정 커패시터와 동기 조상기의 Hybrid형 무효전력보상의 동적 특성을 고찰하였다.
6. 향후 제주 동기 조상기의 노후와에 따른 대체 설비를 위해서는 속응성과 과전압 억제에 관점에서 정지형 무효 보상장치(STATCOM, SVC)와 동기 조상기에 대한 비교 분석 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

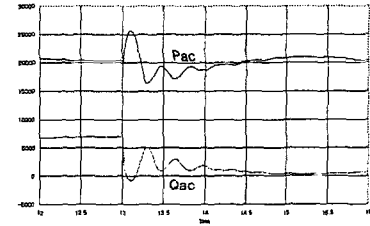
- [1] *High-Voltage Direct Current Handbook*, EPRI Report,
- [2] J.Arrillaga, *High Voltage Direct Current Transmission*, Pter Peregrinus Ltd.,
- [3] T.J.E. Miller, "*Reactive Power Control in Electric Systems*", John Wiley & Sons,
- [4] Cheju-Haenam HVDC System Manuals
- [5] PSCAD/EMTDC User's Manual
- [6] O.B.Nayak, "Dyanmic Performance of Static and Synchronous Compensators at an HVDC Inverter Bus in a Very Weak AC System", *IEEE Transactions on Power System*, Vol.9, No.3, 1994, August
- [7] Y.Zhuang, "*Factors Affecting the Dynamic Performance of a Stacom at a Weak HVDC Terminal*", CIGRE, 1996
- [8] S.Nyati, "Comparison of Voltage Control Devices at HVDC Converter Stations Connected to Weak AC System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.3, No.2, 1988, April



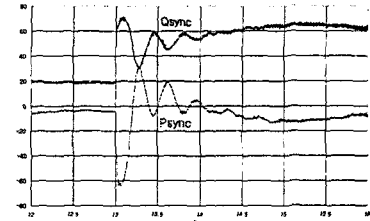
(a) 인버터측 교류전압과 컨버터측 교류전압(rms)



(b) 인버터의 점화각(AOI)과 컨버터의 점화각(AOR)

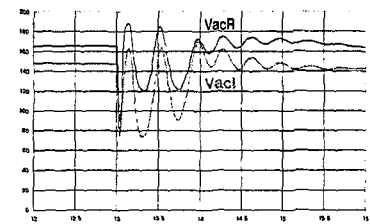


(c) 인버터측의 유효전력과 무효전력

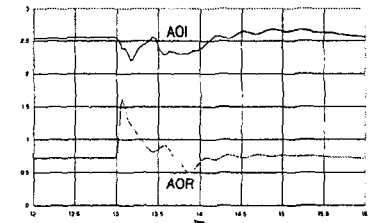


(d) 동기조상기의 유효전력과 무효전력

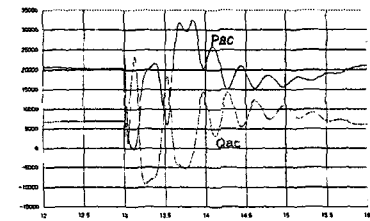
그림 8 제주 인버터단에서 25.7Mavr 커패시터의 스위치 Open시 과도 특성



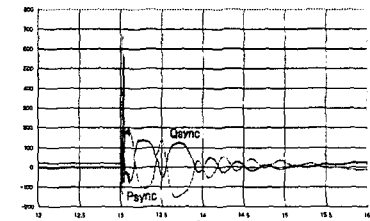
(a) 인버터측의 교류전압과 컨버터측의 교류전압(rms)



(b) 인버터의 점화각(AOI)과 컨버터의 점화각(AOR)



(c) 인버터측의 유효전력(Pac)과 무효전력(Qac)



(d) 동기조상기의 유효전력과 무효전력

그림 9 제주 인버터단에서 1상 고장시 과도특성