



(19)대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(51) 。 Int. Cl.  
H02J 3/18 (2006.01)

(11) 공개번호 10-2007-0072295  
(43) 공개일자 2007년07월04일

(21) 출원번호 10-2006-0017796  
(22) 출원일자 2006년02월23일  
심사청구일자 2006년02월23일

(30) 우선권주장 1020050136005 2005년12월30일 대한민국(KR)

(71) 출원인 고려대학교 산학협력단  
서울 성북구 안암동5가1 고려대학교 내

(72) 발명자 장길수  
서울 중랑구 묵1동 신내5단지두산아파트 528-703  
오세승  
서울 서대문구 연희동 105-17 201호

(74) 대리인 현중철

전체 청구항 수 : 총 11 항

(54) 무효전력 보상방법 및 그 장치

(57) 요약

본 발명은 계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 단계, 상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 단계, 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하는 단계, 상기 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 단계, 상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계 및 상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 단계를 포함한다.

본 발명에 의하면, 필터의 스위칭 포인트 근처에서 HVDC 시스템이 운전될 때, 발전기 출력이 잦은 변동으로 필터를 계통과 연결하는 스위치의 과도한 동작을 방지하고, 스위치의 수명을 연장시키고, HVDC 변환설비에 가해지는 전기적 충격을 줄일 수 있다.

대표도

도 3

특허청구의 범위

청구항 1.

계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 단계;

상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 단계; 및

상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하는 단계를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 2.

제 1 항에 있어서,

상기 커패시터 뱅크 용량을 연산하는 단계는

상기 계통에서 커패시터 뱅크가 공급하는 무효전력량이 상기 계통이 요구하는 무효전력량 이하가 되도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제1방정식을 설정하는 단계;

상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 무효전력량이 상기 무효전력공급장치의 최대공급용량 이하가 되도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제2방정식을 설정하는 단계;

상기 계통의 운전구간이 소정의 주 운전구간 범위내에 존재하도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제3방정식을 설정하는 단계; 및

상기 제1방정식, 제2방정식 및 제3방정식에 분기한정법을 적용하여 상기 커패시터 뱅크 용량을 연산하는 단계를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 3.

계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 단계;

상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계; 및

상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 단계를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 4.

제 3 항에 있어서,

상기 모선별 감도를 연산하는 단계는

상기 계통에 대한 야코비안(Jacobian) 행렬을 이용하여 상기 모선별 감도를 연산하는 단계인 것을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 5.

제 3 항에 있어서,

상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계는

상기 소정의 허용 전압변동 범위가 상기 계통의 전압 변화율이 0.05 이내인 것을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 6.

계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 단계;

상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 단계;

상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하는 단계;

상기 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 단계;

상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계; 및

상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 단계를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 7.

제 6 항에 있어서,

상기 커패시터 뱅크 용량을 연산하는 단계는

상기 계통에서 커패시터 뱅크가 공급하는 무효전력량이 상기 계통이 요구하는 무효전력량 이하가 되도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제1방정식을 설정하는 단계;

상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 무효전력량이 상기 무효전력공급장치의 최대공급용량 이하가 되도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제2방정식을 설정하는 단계;

상기 계통의 운전구간이 소정의 주 운전구간 범위내에 존재하도록 하는 상기 커패시터 뱅크 용량에 관한 제3방정식을 설정하는 단계; 및

상기 제1방정식, 제2방정식 및 제3방정식에 분기한정법을 적용하여 상기 커패시터 뱅크 용량을 연산하는 단계를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 8.

제 6 항에 있어서,

상기 모선별 감도를 연산하는 단계는

상기 계통에 대한 야코비안(Jacobian) 행렬을 이용하여 상기 모선별 감도를 연산하는 단계인 것을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 9.

제 6 항에 있어서,

상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계는

상기 소정의 허용 전압변동 범위가 상기 계통의 전압 변화율이 0.05 이내인 것을 특징으로 하는 무효전력 보상방법.

## 청구항 10.

제 1 항 내지 제 9 항 중 어느 한 항의 방법을 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 기록한 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체.

## 청구항 11.

계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 후보용량 연산부;

상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 최소스위칭용량 선택부;

상기 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 감도 연산부;

상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 무효전력 연산부; 및

상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하고, 상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 용량 조절부를 포함함을 특징으로 하는 무효전력 보상장치.

## 명세서

### 발명의 상세한 설명

#### 발명의 목적

#### 발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템에 관한 것으로 특히, 주 동작 범위를 고려한 무효전력 보상방법 및 그 장치에 관한 것이다.

HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템은 수전 받는 유효전력의 양에 따라 무효전력을 소모하게 된다. 따라서 무효전력을 공급해주는 조상설비(調相設備:phase modifying equipment)를 가지고 있거나 교류계통으로부터 공급받게 된다. 교류계통으로부터 공급받는 경우 교류계통의 무효전력 예비력이 충분하고 무효전력 공급원이 HVDC 시스템 근처에 존재하여 무효전력을 HVDC 시스템에 안정적으로 공급해 줄 수 있을 경우 문제가 없지만, 교류계통에서 발생한 외란으로 인하여 교류전압의 연동이 LTC(Load Tap Changer)의 대응 동작보다 빠르게 일어난다면 HVDC 컨버터는 직류 전압을 일정하게 유지하려고 점화각(firing angle)을 조정하게 된다.

교류전압의 강하가 매우 빠르고 순간적으로 일어나 컨버터의 점호각( $\alpha$ ), 소호각( $\gamma$ ) 조절이 이에 대응하지 못하게 되면 전류실패(commutation failure)가 일어나게 된다. 전류실패가 일어나게 되면 직류 제어가 회복될 때까지 유효전력 전송이 중단된다. 유효전력 전송이 회복되는 동안 컨버터의 무효전력 요구량은 대략 증가되는 유효전력에 비례하여 증가하기 때문에 동적으로 제어되는 무효전력 공급 시스템이 HVDC 시스템의 동적특성에 중요한 요소가 된다.

이러한 무효전력 보상장치 중 가장 일반적인 것은 커패시터 뱅크로 값이 싸고 제어가 쉽다는 장점이 있다. 그러나 스위치 특히 기계적 스위치를 이용하는 커패시터 뱅크의 경우 동적인 무효전력 보상장치는 될 수 없으며 공급 무효전력이 모션전압에 비례하므로 전압이 낮은 상태에서는 예정된 무효전력을 공급하지 못하게 된다.

그러나, HVDC시스템에는 고조파 필터가 설치되어 있고 이는 전력 주파수 60Hz에서 무효전력을 공급하는 커패시터 뱅크로 동작하므로 이들 필터 뱅크와 필터 스위칭에 의한 무효전력이 교류계통으로 흘러들어가는 것을 방지하기 위한 리액터 뱅크가 유효전력 변화에 따라 무효전력을 공급한다.

도 1a는 종래의 무효전력 보상방법에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

도 1a에서, DTF(Dual Tuned Filter) 및 HPF(High Pass Filter)는 고조파를 제거하기 위한 필터들이다. 도 1a에서, SHNT.R은 커패시터 뱅크를 포함하는 스위치 셉트 뱅크를 의미한다.

도 1a에서 보는 바와 같이, 주 운전구간(Pdc)가 변화함에 따라 모든 필터 및 스위치 셉트 뱅크가 동작하게 된다. 즉, 필터에 설치된 스위치가 과도하게 스위칭된다는 것을 알 수 있다.

도 1b는 종래의 무효전력 보상방법에 따른 무효전력의 수급상태를 도시한 그래프이다.

도 1b에서, 평균적으로 유효전력이 20 메가 와트 변화할때마다 무효전력 공급량이 변화됨을 알 수 있다. 즉, 도 1a와 마찬가지로 필터에 설치된 스위치가 과도하게 스위칭된다는 것을 알 수 있다.

따라서, 종래의 무효전력 보상방법은 필터의 스위칭 포인트 근처에서 HVDC 시스템이 운전될 때, 발전기 출력이 잦은 변동으로 필터를 계통과 연결하는 스위치가 과도하게 동작하게 하고, 스위치에 과도한 스트레스를 주어 수명을 단축시키는 문제점이 있다.

### 발명이 이루고자 하는 기술적 과제

상기의 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 필터에 연결된 스위치의 스위칭 횟수를 최소화시키는 커패시터 뱅크의 용량을 결정하고, 계통에 적용하는 무효전력 보상방법을 제공하는데 있다.

상기의 다른 기술적 과제를 해결하기 위하여, 본 발명은 상기의 무효전력 보상방법이 적용된 무효전력 보상장치를 제공하는데 있다.

### 발명의 구성

상기의 기술적 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급 장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 단계, 상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 단계 및 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하는 단계를 포함한다.

또한, 상기의 기술적 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 계통에 연결된 부하 모선의 모션별 감도를 연산하는 단계, 상기 모션별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계 및 상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 단계를 포함한다.

또한, 상기의 기술적 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 단계, 상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 단계, 상

기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하는 단계, 상기 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 단계, 상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 단계 및 상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 단계를 포함한다.

상기의 다른 기술적 과제를 해결하기 위하여 본 발명은 계통이 요구하는 무효전력량, 상기 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 상기 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산하는 후보용량 연산부, 상기 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 상기 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택하는 최소스위칭용량 선택부, 상기 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산하는 감도 연산부, 상기 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산하는 무효전력 연산부 및 상기 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 상기 최소스위칭 용량으로 조절하고, 상기 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 상기 커패시터 뱅크 용량을 증가시키는 용량 조절부를 포함한다.

이하에서는 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 설명하기로 한다.

도 2는 본 발명에 따른 무효전력 보상장치의 블록도이다.

발전기(200)의 교류 전력은 HVDC 시스템에서는 직류로 변환되고, 부하(220)에서는 다시 교류로 변환된다.

커패시터 뱅크(210)는 필터(미도시)를 포함하는 무효전력 공급장치를 나타낸다.

후보용량 연산부(230)는 계통이 요구하는 무효전력량, 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산한다.

최소스위칭용량 선택부(240)는 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 커패시터 뱅크(210)의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소스위칭 용량을 선택한다.

감도 연산부(250)는 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산한다.

무효전력 연산부(260)는 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 계통에 연결된 커패시터 뱅크(210)의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산한다.

용량 조절부(270)는 커패시터 뱅크(210)와 연결되고, 계통에 연결된 커패시터 뱅크(210)의 용량을 위에서 연산된 최소스위칭 용량으로 조절한다. 또한, 용량 조절부(270)는 위에서 연산된 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 커패시터 뱅크(210)의 용량을 증가시킨다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 흐름도이다.

먼저, 계통이 요구하는 무효전력량, 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산한다(300 과정).

바람직하게는, 이 과정(300 과정)은 계통에서 커패시터 뱅크가 공급하는 무효전력량이 계통이 요구하는 무효전력량 이하가 되도록 하는 커패시터 뱅크 용량에 관한 제1방정식을 설정하는 과정을 포함한다.

바람직하게는, 이 과정(300 과정)은 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 무효전력량이 무효전력공급장치의 최대공급용량 이하가 되도록 하는 커패시터 뱅크 용량에 관한 제2방정식을 설정하는 과정을 포함한다.

바람직하게는, 이 과정(300 과정)은 계통의 운전구간이 소정의 주 운전구간 범위내에 존재하도록 하는 커패시터 뱅크 용량에 관한 제3방정식을 설정하는 과정을 포함한다.

바람직하게는, 이 과정(300 과정)은 제1방정식, 제2방정식 및 제3방정식에 분기한정법(branch and bound method)을 적용하여 커패시터 뱅크 용량을 연산하는 과정을 포함한다.

이때, 분기한정법은 방정식의 모든 가능해를 계산하는 열거식의 일종이지만, 해를 분지하면서 상한(upper bound)과 하한(lower bound)을 사용하여 해의 타당성을 신속하게 판별하고 가능한 가능해를 적게 열거하는 방법이다. 즉, 이 기법은 완전열거식이 아니라, 부분열거식이다.

다음, 위에서 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소 스위칭 용량을 선택한다(310 과정).

마지막으로, 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 최소 스위칭 용량으로 조절한다(320 과정).

도 3의 과정을 수학적식으로 설명하면 다음과 같다.

먼저, HVDC 시스템 인버터 단의 무효전력 수급 상태는 하기 수학적식 1과 같이 쓸 수 있다.

$$\sum_{i=1}^4 q_i + Q = 0$$

이로부터 추가적인 무효전력 보상장치의 출력은 하기 수학적식 2와 같이 정의된다.

$$SC_{load} = -q_1 - Q - Q_4$$

HVDC 시스템이 소모하는 무효전력  $Q_1$ 은 일반적으로 수전 유효전력의 50~65% 정도가 되며 교류계통에서 공급받거나 공급되는  $Q_4$ 는 조류(electric power flow)계산을 통하여 구하게 된다.

따라서, 제어변수는 필터와 리액터가 공급하는 무효전력량과 추가적인 무효전력 보상장치의 공급량이 된다.

정수계획(Integer programming)의 분기한정법(Branch and Bound method)을 이용하여 상술한 무효전력 보상을 최적화한다.

이와 같은 과정의 예를 들면 다음과 같다.

HVDC 시스템이 소모하는 무효전력  $Q_1$ 은 수전 유효전력의 50~65% 정도가 되며 교류계통에서 공급받거나 공급되는  $Q_4$ 는 조류계산을 통하여 구한다.

따라서, 제어 변수는 필터와 리액터가 공급하는 무효전력량과 추가적인 무효전력 보상장치의 공급량이 된다.

최적화를 위한 목적함수로는 여러 가지가 가능하지만 여기서는 커패시터 뱅크의 스위칭 최소화로 목적함수를 선택한 경우를 가정한다(식 (3)).

이러한 목적함수를 최소화 하면서 만족시켜야 하는 제약조건들이 존재하는데 식 (4)와 같이 커패시터뱅크가 공급하는 무효전력이 HVDC 시스템이 필요로 하는 무효전력보다 많이 공급하면 안되고, 고조파 제거를 위해 기본적으로 2개의 필터는 항상 투입하여야 하며,

식 (5)와 같이 추가적인 무효전력 공급장치가 있다면 그로부터 공급받는 양도 그 장치의 공급용량내로 제한되어야 하며,

마지막으로 식 (6)과 같이 주 운전구간이 원하는 범위를 만족시켜야 한다.

이러한 것들을 식으로 정리하면 아래 식 (3), (4), (5), (6)과 같다.

$$\text{Min } f(SC_{\text{bad}}) \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{AX} \leq \mathbf{C}$$

$$\mathbf{BX} = \mathbf{D} \quad (4)$$

$$\mathbf{C} = 0.65 \mathbf{P}_k$$

$$\mathbf{D} = 2$$

$$SC_{\text{bad}} \leq 30 \text{ MVar} \quad (5)$$

$$P_a \leq \text{Step}_{\text{main}} \leq P_b \quad (6)$$

where,

$$\mathbf{A} = [Q_{\text{reactor1}} \ L \ Q_{\text{reactor3}} \ Q_{\text{filter1}} \ L \ Q_{\text{filter4}}]$$

$$\mathbf{B} = [0 \ L \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$$

$$\mathbf{X} = [x_1 \ L \ x_7]$$

이러한 최적화 문제를 정수계획(Integer programming)의 분기한정법(Branch and Bound method)을 이용하여 상술한 무효전력 보상을 최적화하면 도 6 및 도 7의 결과를 얻는다.

무효전력 보상을 위한 필터의 단위 용량결정은 단위 커패시터/리액터가 계통에 투입되거나 제거될 때 발생하는 과전압의 크기를 제한하기 위하여 하기 수학식 3과 같이 계통 단락용량의 5% 정도로 사용된다.

$$\text{커패시터/리액터 단위용량} = (\text{단위 계통 단락용량}) \times 0.05$$

저단락비 계통의 경우 계통의 임피던스가 크고 필터를 무효전력 보상장치로 이용하는 경우 수전량 증가에 따라 유효 단락비(ESCR)는 낮아지고 dV/dQ 감도(sensitivity)는 커지기 때문에 스위칭에 따른 전압 문제의 발생 가능성이 커진다. 따라서, 단위 커패시터의 용량을 산정할 때 저단락비 계통의 모선별 dV/dQ 감도(sensitivity)를 계산하여 단위 용량 결정시 고려하여야 한다.

계통의 모선별 감도를 단위 용량 결정시 고려하는 실시예는 다음과 같다.

도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 흐름도이다.

먼저, 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산한다(430 과정). 바람직하게는, 이 과정(430 과정)은 계통에 대한 야코비안(Jacobian) 행렬을 이용하여 모선별 감도를 연산하는 과정을 포함한다.

다음, 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산한다(440 과정). 바람직하게는, 이 과정(440 과정)은 소정의 허용 전압변동 범위가 계통의 전압 변화율이 0.05 이내가 되도록 하는 과정이다.

마지막으로, 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 커패시터 뱅크 용량을 증가시킨다(450 과정).

상술한 모선별 감도를 연산하는 과정을 수학식으로 설명내면 다음과 같다.

각 모선의 감도 매트릭스(sensitivity matrix)는 시스템의 야코비안 매트릭스(Jacobian matrix)로부터 하기 수학식 4 및 수학식 5와 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} & \frac{\partial P_1}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial P_1}{\partial V} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \theta} & \frac{\partial P_2}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial P_2}{\partial V} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta} & \frac{\partial P_n}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial P_n}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{pq}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{pq}}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial P_{pq}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_1}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_1}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_2}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_2}{\partial V} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_n}{\partial t_{pq}} & \frac{\partial Q_n}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \\ \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \\ \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix}$$

상기 수학식 5에서 모든 상태변수를 우변으로, 종속변수를 좌변으로 옮기면 식을 하기 수학식 6과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta P_{pq} \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix}$$

상기 수학식 6은 다음의 수학식 7 및 수학식 8과 같이 두 부분으로 나눌 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix}$$

여기서,  $t_{pq}$  = p와 q모선 사이 변압기 tap 위치,  $S^*$  = sensitivity matrix, 발전기 모선 = 1, 2, ..., m, 그리고 부하모선 = m+1, ..., n 이다.

상기 수학식 7과 수학식 8의 종속변수인  $\Delta P$ ,  $\Delta V$ 는 상기 수학식 1과 수학식 2를 만족시켜야 하므로 다음과 같이 수학식 9 및 수학식 10으로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_1^{\min} \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta Q_1^{\max} \\ \vdots \\ \Delta Q_m^{\max} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{m+1}^{\min} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\min} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1} \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_{pq} \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_m \\ \Delta Q_{m+x} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \Delta V_{m+1}^{\max} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{\max} \end{bmatrix}$$

여기서,  $\Delta Q_{\min i} = Q_{\min i} - Q_i$ ,  $\Delta Q_{\max i} = Q_{\max i} - Q_i$ ,  $Q_{\min i}$  = 발전기 모선 i에서의 최소 무효전력 출력값,  $Q_{\max i}$  = 발전기 모선 i에서의 최대 무효전력 출력값,  $Q_i$  = 발전기 모선 i에서의 실제 무효전력 출력값, i = 발전기 모선(1, 2, ..., m), 그리고 m+x = switched shunt 뱅크가 있는 모선( $m \leq m+x \leq n$ )이다.

결과적으로, 수학식 10에서부터 부하 모선 i의  $dV/dQ$ 를 구할 수 있다.

또한, 5%의 허용 전압변동 하에서 스위치 셉트(switched shunt) 뱅크의 무효전력 변화량의 최대/최소량을 결정할 수 있다.

도 5는 본 발명의 또다른 실시예에 따른 흐름도이다.

먼저, 계통이 요구하는 무효전력량, 계통에 존재하는 추가적인 무효공급장치의 최대공급용량 및 계통의 주 운전구간 범위를 만족시키는 커패시터 뱅크 용량들을 연산한다(500 과정).

다음, 연산된 커패시터 뱅크 용량들 중 커패시터 뱅크의 스위칭 횟수를 최소화시키는 최소 스위칭 용량을 선택한다(510 과정).

최소 스위칭 용량이 선택되면, 계통에 연결된 커패시터 뱅크 용량을 최소 스위칭 용량으로 조절한다(520 과정).

다음, 계통에 연결된 부하 모선의 모선별 감도를 연산한다(530 과정).

모선별 감도가 연산되면, 모선별 감도 및 소정의 허용 전압변동 범위를 이용하여 계통에 연결된 커패시터 뱅크의 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값을 연산한다(540 과정). 바람직하게는, 소정의 허용 전압변동 범위는 계통의 전압 변화율이 0.05 이내인 범위이다.

마지막으로, 위에서 연산된 무효전력 변화량의 최대값 및 최소값에 따라 커패시터 뱅크 용량을 증가시킨다(550 과정).

도 6은 도 3의 실시예에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

도 6에서, DTF(Dual Tuned Filter) 및 HPF(High Pass Filter)는 고조파를 제거하기 위한 필터들이다. 도 6에서, SHNT.R은 커패시터 뱅크를 포함하는 스위치 셉트 뱅크를 의미한다.

도 6에서 고조파 제거를 위한 필터인 두번째 DTF에서는 스위칭이 일어나지 않는다는 것을 알 수 있고, 전체적으로 스위칭 횟수가 도 1a에 비하여 줄어들었다는 것을 알 수 있다.

도 7은 도 3의 실시예에 따른 무효전력의 수습상태를 도시한 그래프이다.

도 7에서 유효전력 변화에 따른 무효전력 변화가 도 1b에 비하여 적어졌다는 것을 알 수 있다.

도 8은 도 5의 실시예에 따라 5 %의 허용범위 내에서 과전압 값을 연산한 결과를 도시한 그래프이다.

수학식 10에서부터 부하 모선 i의  $dV/dQ$ 를 구하면, 5 %의 허용 전압변동 하에서 스위치 셉트(switched shunt) 뱅크의 무효전력 변화량의 최대/최소량을 결정할 수 있다. 예를 들어, 캐패시터 뱅크 용량이 13.75MVar, 27.5MVar, 37.5MVar일 때의 최대 과전압값이 도 8와 같이 계산되며 5%가 변동 허용치 일 때 37.5MVar까지 증가시킬 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

도 9는 도 5의 실시예에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

도 9에서, DTF(Dual Tuned Filter) 및 HPF(High Pass Filter)는 고조파를 제거하기 위한 필터들이다. 도 9에서, SHNT.R은 커패시터 뱅크를 포함하는 스위치 셉트 뱅크를 의미한다.

도 10은 도 5의 실시예에 따른 무효전력의 수습상태를 도시한 그래프이다.

도 9 및 도 10에서, 상술한 도 3 및 도 4의 방법을 동시에 적용하면 도 6과 도 7의 결과를 더 최적화시킬 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉, 캐패시터 뱅크의 크기를 늘림으로써 좀 더 최적화 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

도 9 및 도 10에서, 스위칭 횟수가 2번으로 종래의 무효전력 보상방법에 비해 적고, 4개의 필터 중 2개(DTF #2 및 HPF #2)는 사용되지 않으므로 필터가 이미 설치된 상태에서는 시스템의 신뢰도를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다. 또한, HVDC 주 운전 구간이 110~150MW로 기존 것에 비해 수전량이 많을 때 수전량 변화시 스위칭 횟수가 적은 장점이 있다는 것을 알 수 있다.

바람직하게는, 본 발명의 무효전력 보상방법은 컴퓨터에서 실행시키기 위한 프로그램을 컴퓨터로 읽을 수 있는 기록매체의 형태로 제공될 수 있다.

본 발명은 소프트웨어를 통해 실행될 수 있다. 소프트웨어로 실행될 때, 본 발명의 구성 수단들은 필요한 작업을 실행하는 코드 세그먼트들이다. 프로그램 또는 코드 세그먼트들은 프로세서 판독 가능 매체에 저장되거나 전송 매체 또는 통신망에서 반송파와 결합된 컴퓨터 데이터 신호에 의하여 전송될 수 있다.

본 발명은 도면에 도시된 일 실시예를 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

## 발명의 효과

상술한 바와 같이 본 발명에 의하면, 계통의 강건도(strength)와 모든 무효전력 공급원을 고려하면서 계통과 필터를 연결하는 스위치의 스위칭 횟수를 최소화시키는 커패시터 뱅크의 용량을 결정하고 계통에 적용함으로써, 필터의 스위칭 포인트 근처에서 HVDC 시스템이 운전될 때, 발전기 출력이 잦은 변동으로 필터를 계통과 연결하는 스위치의 과도한 동작을 방지하고, 스위치의 수명을 연장시키고, HVDC 변환설비에 가해지는 전기적 충격을 줄일 수 있는 효과가 있다.

## 도면의 간단한 설명

도 1a는 종래의 무효전력 보상방법에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

도 1b는 종래의 무효전력 보상방법에 따른 무효전력의 수급상태를 도시한 그래프이다.

도 2는 본 발명에 따른 무효전력 보상장치의 블럭도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 다른 실시예에 따른 흐름도이다.

도 5는 본 발명의 또다른 실시예에 따른 흐름도이다.

도 6은 도 3의 실시예에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

도 7은 도 3의 실시예에 따른 무효전력의 수급상태를 도시한 그래프이다.

도 8은 도 5의 실시예에 따라 5 %의 허용범위 내에서 과전압 값을 연산한 결과를 도시한 그래프이다.

도 9는 도 5의 실시예에 따른 스위칭 on/off 상태를 도시한 것이다.

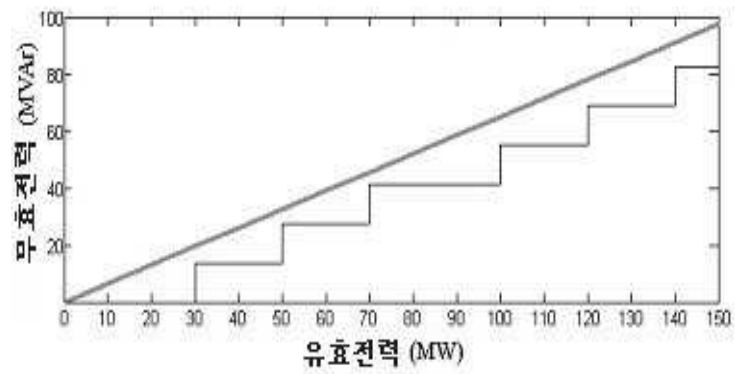
도 10은 도 5의 실시예에 따른 무효전력의 수급상태를 도시한 그래프이다.

## 도면

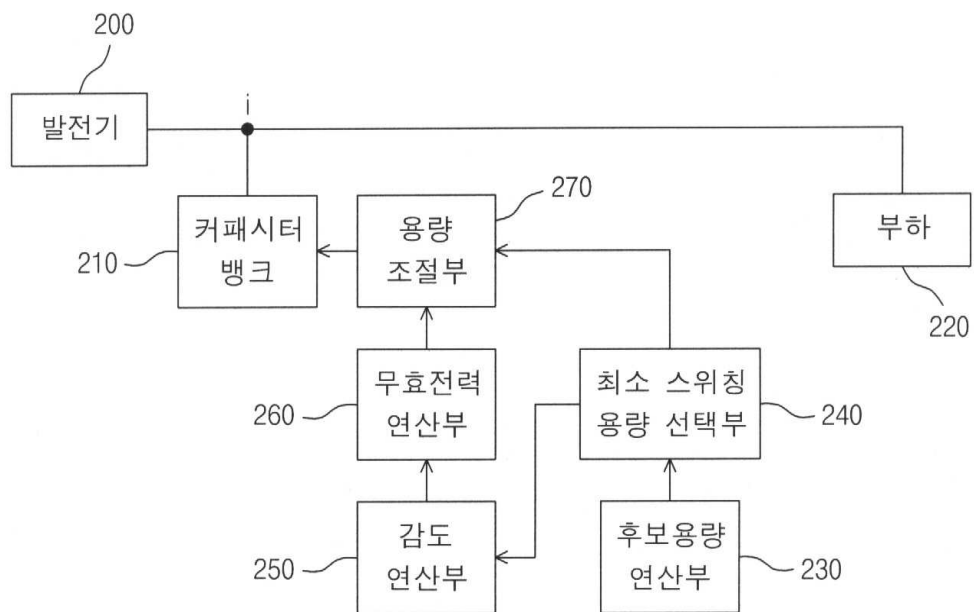
도면1a

| Pdc(MW)   | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| DTF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| DTF #2    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| HPF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| HPF #2    |   |    |    |    |    | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| SHNT.R.#1 | ✓ | ✓  | ✓  |    |    | ✓  | ✓  |    |    |    | ✓   | ✓   |     |     |     |     |
| SHNT.R.#2 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |     |     |
| SHNT.R.#3 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |

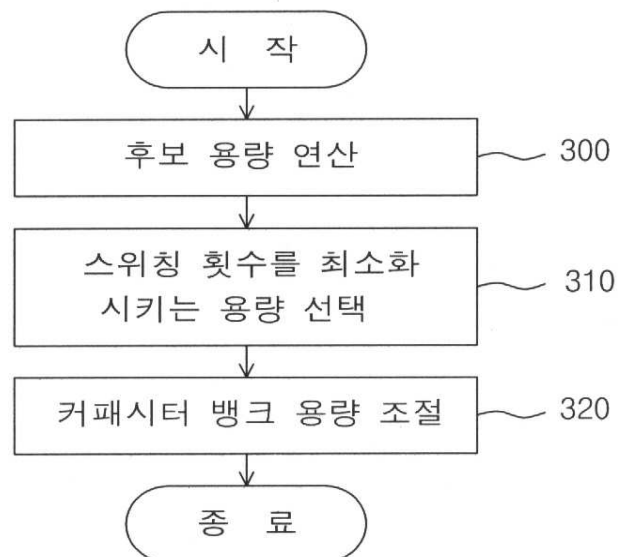
도면1b



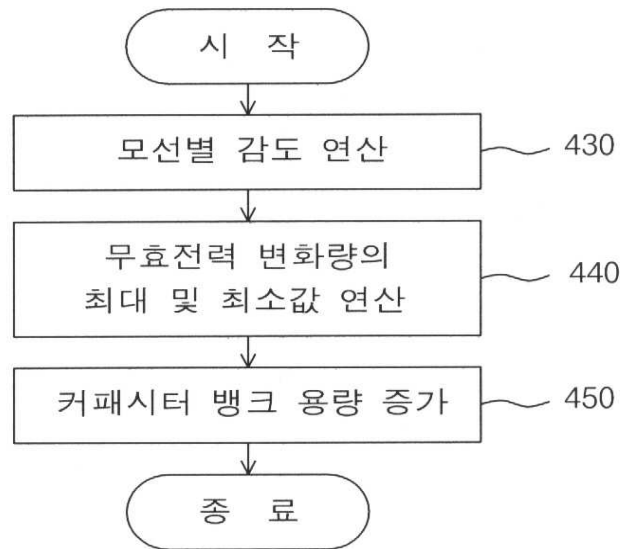
도면2



도면3



도면4



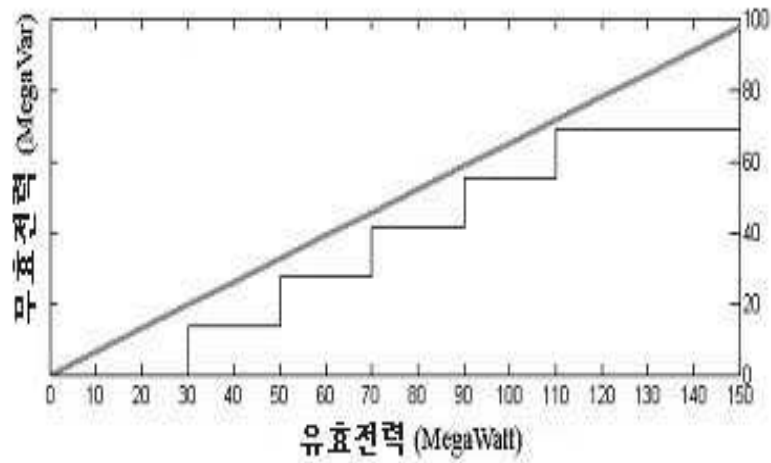
도면5



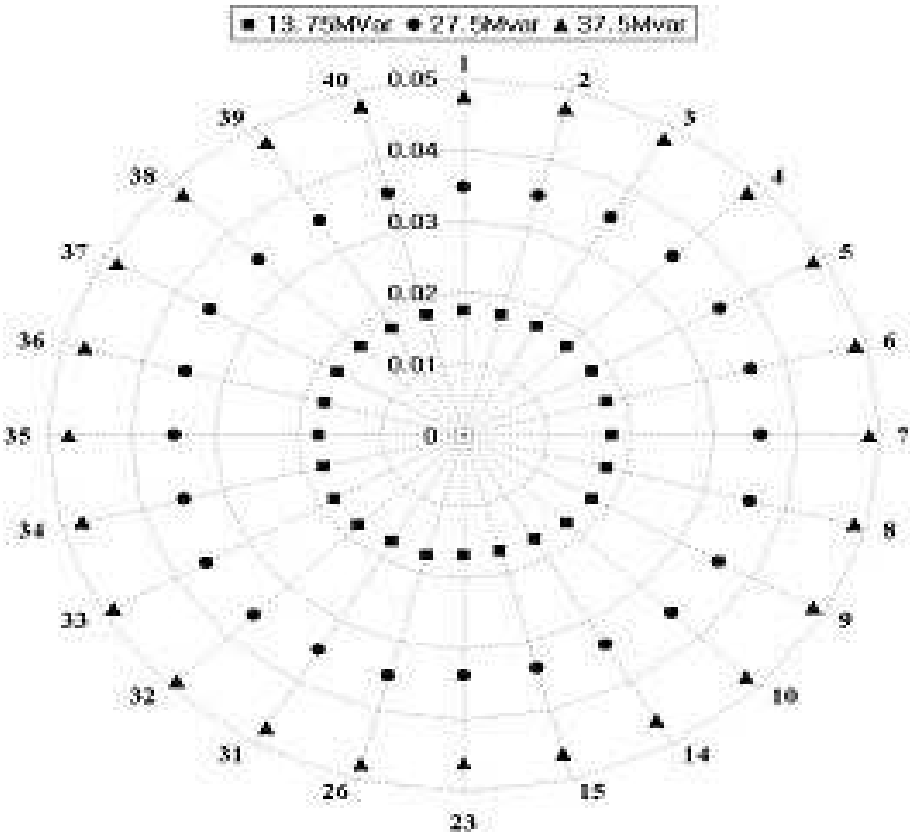
도면6

|           |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |
|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pdc       | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
| DTF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| DTF #2    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |
| HPF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |     | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| HPF #2    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| SHNT.R.#1 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |    |    | ✓  | ✓  |    |     |     |     |     |     |     |
| SHNT.R.#2 | ✓ | ✓  | ✓  |    |    |    |    |    |    |    |     |     | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| SHNT.R.#3 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |    |    |    |     |     |     |     |     |     |

도면7



도면8



도면9

| Pdc       | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 |
|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| DTF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| DTF #2    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |
| HPF #1    | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   |
| HPF #2    |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |
| SHNT.R.#1 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |     |     |     |     |     |     |
| SHNT.R.#2 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |     |     |     |     |     |     |
| SHNT.R.#3 | ✓ | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  | ✓  |    |    |    |    |     |     |     |     |     |     |

도면10

