

»모아는 Challenge다«

전기분야의 Legend, 모아전기학원

**제 118회 발송배전기술사**

**[문제풀이집]**

교수: 하용일

**Legend 모아전기학원의 자랑!**

모아전기학원 2012~2019년

**전체수강생의 1/7을 합격시킨, 진정한 Legend!**

“실제 수강생 대비 합격률 대한민국 1위”

강의만족도 90%, 강의 평균 재수강률 80%

“8년간의 검증” 모방이 불가능한 커리큘럼

열정적으로 2019년을 시작합니다.

**Legend 모아전기학원의 최강의 강사진!**

왕모아 원장 “건축전기 특강반과 기본반, 전기안전 특강반”

하용일 교수 “섬세한 발송배전 기본튼튼 강의”

오부영 교수 “최단기 합격비법 전기안전·전기응용반 강의”



전기 교육전문학원 ———

**모아전기학원**

02) 2068- 2851

## » 모아전기학원 전기기술사반의 Strength!

첫 번째: 대한민국 최고의 강사진!

- ▷ 최고 전문성을 갖춘 검증된 소방기술사 교수진 5명 강의 중

두 번째: 충분한 공부시간 확보!

- ▷ 정규반/심화반 수업(상/하 총 120~160시간 확보)
- ▷ 별도의 스터디를 통한 학습효과 극대화

세 번째: Class Line-up!

- ▷ 건축전기 2개 Class, 발송배전 2개 Class, 전기안전 2개 Class, 전기용융 1개 Class 운영 중! ▷ 총 7개 Class 개강 운영 중!

네 번째: 동영상 혹은 교재 무료제공!

- ▷ 수강 기간 동안 제공되는 복습용 동영상 or 해당 과정 교재 택1 가능
- ▷ 현장강의 수강시 동일과목 동영상강의 무료제공!!

다섯 번째: 스터디 룸 무료제공!

- ▷ 토요일/일요일: 정규반, 심화반 오전/오후 별도의 스터디룸 제공
- ▷ 평일 스터디룸(24시간) 무한 제공!

## 2019년 5월 전기기술사 개강일정



### 건축전기기술사

CLASS	개강일정	시간	강의수	교재
건축전기의 중요핵심 SGN 기본반	5월 19일 ~ 7월 21일 (매주 일요일)	오후 3시~8시30분	10강	모아 건축전기기술사1권
영혼있는 답안작성 SBR 연구반	5월 19일 ~ 7월 21일 (매주 일요일)	오전 10시~오후 6시	10강	모아 건축전기기술사 +보충자료

### 전기안전기술사

CLASS	개강일정	시간	강의수	교재
쓸 수 있는 공부 SGN 기본반	5월 18일 ~ 7월 27일 (매주 토요일)	오후 3시~8시	11강	모아 전기안전기술사 +보충자료
마무리 토론과 모의고사 SBR 연구반	5월 18일 ~ 7월 27일 (매주 토요일)	오전 10시~오후 3시	11강	모아 전기안전기술사 +보충자료

### 발송배전기술사

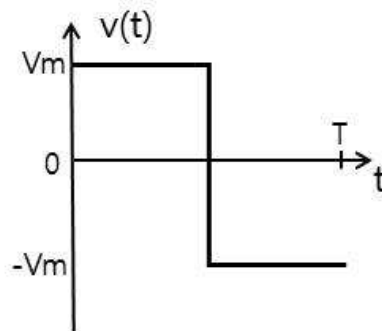
CLASS	개강일정	시간	강의수	교재
철저한 기본주의 기본반	5월 18일 ~ 7월 27일 (매주 토요일)	오후 3시~9시	11강	발송기본3권(송길영) 동일출판사
고정관념 제거 심화 연구반	5월 18일 ~ 7월 27일 (매주 토요일)	오전 9시~오후 3시	11강	자체교재

## 제118회 발송배전기술사 1차 필기시험 문제 (2019년 5월 5일)

### 제 1교시 문제

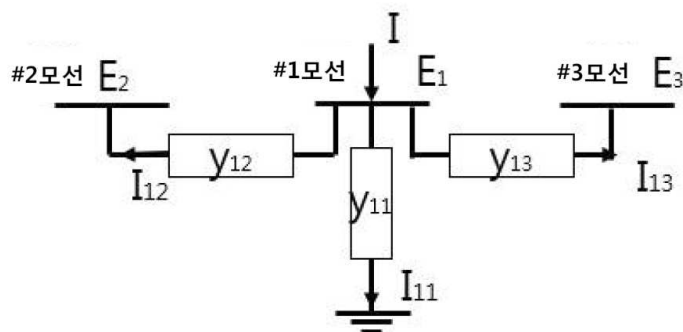
※ 다음 문제 중 10문제를 선택하여 설명하시오. (각10점)

1. 발전기 후비보호 방식의 종류별 동작개념 및 특성을 비교 설명하시오.
2. 변압기 절연내력(Dielectric Strength)을 정의하고, 변압기 제작 후 절연내력을 검증하기 위한 시험에 대하여 설명하시오.
3. 기력 발전소의 열효율에 영향을 미치는 요소들에 대하여 설명하시오.
4. 철탑계탑공법(鐵塔繼塔工法)의 개요 및 특징에 대하여 설명하시오.
5. 지중케이블 냉각방식의 종류와 특징에 대하여 설명하시오.
6. 피뢰기 정격전압의 정의와 정격전압 결정시 고려사항에 대하여 설명하시오.
7. 전력계통의 특성 해석을 위한 부하응답 모델에 대하여 설명하시오.
8. 3전류계법으로 단상전력을 측정하는 방법을 설명하시오.
9. 전력수급 비상시 시행하는 순환단전 방법 및 제외 대상시설에 대하여 설명하시오.
10. 우리나라에서 실시하고 있는 중장기 배전계획의 절차를 설명하시오.
11. 태양광발전시스템에서 독립형과 계통연계형을 비교 설명하시오.
12. 파형률(Form Factor)과 파고율(Crest Factor)에 대하여 설명하고, 아래 파형에 대한 파형률과 파고율을 구하시오.



〈 구형파(Square wave) 〉

13. 전력계통을 망 방정식보다 모선 방정식으로 표현하는 이유를 설명하고, 다음 계통에 대하여 3단자 모선 방정식의 어드미턴스  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$ 를 구하시오. (단, 계통 내부에는 기전력이 포함되지 않고, 충전 커패시턴스, 전력콘덴서 등은 부하로 취급)



## 제 2교시 문제

※ 다음 문제 중 4문제를 선택하여 설명하시오. (각25점)

1. 동기발전기의 병렬 운전조건이 일치하지 않을 때 발생하는 문제점에 대하여 설명하시오.
2. 전력구 풍냉시스템 송풍방식의 종류, 특징 및 적용기준을 설명하시오.
3. 해저케이블 경과지 조사 시 포설루트의 필요조건 및 조사항목을 설명하시오.
4. 전력품질의 정의와 평가지표에 대하여 설명하시오.
5. 다음과 같은 연료비 특성을 가진 2대의 발전기로 구성된 계통이 있다.

$$F_1 = 0.01P_{G1}^2 + 4P_{G1} + 8000 [10^3 \text{원/MWh}]$$

$$F_2 = 0.03P_{G2}^2 + 4P_{G2} + 10000 [10^3 \text{원/MWh}]$$

부하  $P_R$ 이 50 [MW] 일 때, 다음 조건에서 연료비를 비교하시오.

- 1)  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 균등하게 부하  $P_R$ 을 분담할 경우
  - 2)  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 경제부하배분 출력으로 부하  $P_R$ 을 분담할 경우
6. 우리나라의 일반적인 배전계통 배전전압을 22.9[kV-Y] 3상4선식 다중접지방식으로 선정한 기술적, 경제적 이유에 대하여 설명하시오.

## 제 3교시 문제

※ 다음 문제 중 4문제를 선택하여 설명하시오. (각25점)

1. 수차의 전기식 조속기와 기계식 조속기를 비교하고, 조속기의 속도조정률과 속도변동률에 대하여 설명하시오.
2. 345 [kV] 및 154 [kV] 변압기 중성점 피뢰기의 정격전압을 선정하고, 발전기 무부하운전 중 주변압기 (22/345 [kV],  $\Delta$ -Y결선, 중성점 비접지)의 2차(고압)측에서 1선지락 발생 시 중성점에 설치된 피뢰기의 건전성을 판정하시오.
3. 초전도 자기에너지 저장설비(SMES)의 기본구성, 동작원리, 특징 및 적용에 대하여 설명하시오.
4. 전선로나 변전소에 사용되는 애자의 염진해 대책에 대하여 설명하시오.
5. 국내에 적용 중인 'FACTS(Flexible AC Transmission System)' 설비에 대하여 보상 대상, 제어목적, 동작원리 및 특징을 각각 설명하시오.
6. 사선상태에서 고전압 회전기(발전기, 전동기)의 고정자 권선 절연진단 방법에 대하여 설명하시오.

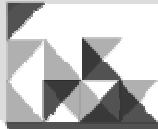
#### 제 4교시 문제

※ 다음 문제 중 4문제를 선택하여 설명하시오. (각25점)

1. 연료전지 중 고체산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)의 특성과 장·단점을 설명하시오.
2. 345 [kV] 및 154 [kV] 모선과 송전선에 적용되는 계기용 변압기의 설치, 결선방식 및 용도에 대하여 설명하시오.
3. 유입식변압기의 유증가스를 이용한 상태진단 및 고장진단 방법에 대하여 설명하시오.
4. 1일 부하변동과 발전소 운용의 특징 및 기저부하, 중간부하, 첨두부하 담당 발전소의 요구조건에 대하여 각각 설명하시오.
5. ATS(Automatic Transfer Switch)와 CTTS(Closed Transition Transfer Switch)를 비교하고, 「분산형전원 배전계통 연계 기술기준」에 따라 비상발전기를 계통에 연결하기 위한 동기화 방법을 설명하시오.
6. 22.9 [kV] 3상4선식 계통에서 3상 단락전류  $I_s$ , 1선지락 고장전류  $I_g$ 를 구하시오. (단, 주변압기 자기용량은 3상 50 [MVA]이고, 100 [MVA]기준 정격전류( $I_n$ ) 및 1[ $\Omega$ ]당 고장저항값의 %Impedance는 각각 2500 [A], 20 [%]로 계산할 것)

##### 〈계산조건〉

- 1) 계통의 %Impedance(100[MVA] 기준) : 15 [%]
- 2) 주변압기 %Impedance(자기용량에서) : 2.5 [%]
- 3) 선로의 정상 %Impedance(100[MVA] 기준) : 30 [%]
- 4) 선로의 영상 %Impedance(100[MVA] 기준) : 45 [%]
- 5) 1선지락 시 고장저항값 : 5 [ $\Omega$ ]



# 제 1 교시 문제풀이

## 1-1. 발전기 후비보호 방식의 종류별 동작개념 및 특성을 비교 설명하시오.

답)

### 1. 발전기 후비보호 방식의 종류

발전소 연계선로의 보호방식이 거리계전방식일 경우 발전기 단락 후비보호로써 거리계전방식을 적용하고, 과전류방식일 경우 과전류계전방식, 전압 억제부 과전류계전방식을 적용한다.

### 2. 동작개념 및 특성을 비교 설명

#### 1) 과전류 계전방식

단락 후비보호용으로서 발전기 정격전류의 150%에 정정하며, 외부고장시 오동작 방지를 위하여 송전선 보호계전기 동작시간과 충분한 협조를 고려한다.

#### 2) 거리계전방식

(1) 거리계전방식은 계전기 설치점에서 고장점 까지의 전기적거리를 전압, 전류의 크기 및 위상차로 판별하여 동작하는 계전방식으로 발전기 단락후비보호용으로 사용된다.

(2) 발전기에 설치하는 후비보호 거리 계전기는 2종류의 단락사고에 동작한다.

① 승압 변압기 이후의 선로사고에 대한 동작(전방사고)

- 전방사고의 주 보호 계전기는 여러 가지가 있을 수 있으나 주보호 계전기가 동작하지 못하였을 때 충분한 시간지연을 갖고 동작한다.
- 전방사고 발생시 주보호 계전기와 후비보호 계전기가 동작하지 않는다면 전방사고에 동작할 수 있는 계전기는 없기 때문에 발전기 및 전력계통 안정도에 심각한 영향을 미친다.

② 발전기 출력단자와 승압 변압기간의 선로 사고에 동작(후방사고).

(3) 정정기준

- 전방 : 다음 ①, ② 중 작은 값을 적용하고 동작시간은 2.5[sec] 한시에 정정한다.

① 발전기 정격전압 기준으로 최대출력의 150%에 해당하는 임피던스

② {변압기(Step up Tr)임피던스 + (연계 송전선로 임피던스×결보기계수)}의 최대값

- 후방 : 발전기 과도임피던스보다 크게 정정하며, 발전기 내부 고장 시에도 충분히 동작할 수 있도록 정정한다.

### 3) 전압억제부 과전류 계전방식

- (1) 모선, T/L등 외부 사고 시 외부사고가 조속히 제거되지 않으면 51V가 동작하여 단락사고 후비보호 및 과부하를 보호한다.
- (2) 최근 터빈발전기는 단락비가 적고 단락전류도 적으므로 단순한 OCR로는 정격전류와의 구별이 어려워 단락사고 시 전압이 저하되는 것을 이용하여 거리 R/y와 한시 R/y에 의해 발전기를 Trip과 동시에 터빈도 Trip 시킨다.
- (3) 정정기준
  - ① 동작치 정정은 정격전류의 150%, 전압억제부 전압 80%에서 정정
  - ② 한시 정정은 전위 보호 계전기와 협조할 것(0.4~0.5sec)

**1-2. 변압기 절연내력(Dielectric Strength)을 정의하고, 변압기 제작 후 절연내력을 검증하기 위한 시험에 대하여 설명하시오.**

답)

**1. 변압기 절연내력(Dielectric Strength)을 정의**

절연체에 가해진 전압이 어느 한도를 넘으면 갑자기 대전류가 흘러서 절연이 파괴되는데, 이 때 전압의 한계값을 절연 내력(dielectric strength)이라 한다.

**2. 절연내력을 검증하기 위한 시험**

**1) Lightning impulse test(충격전압시험/LI)**

변압기 또는 인접 송전선에 낙뢰가 떨어질 때 발생하는 급격하고 복잡한 전기적 현상에 대하여 권선 절연이 견디는 가를 확인하는 시험(BIL)

(1) 표준충격파형은  $1.2 \times 50\mu s$  파형을 표준으로 한다.

(2) 인가파형의 극성은 부극성으로 한다.

(3) 시험절차

① 시험하지 않는 권선은 필히 접지한다.

② 기준파형은 얻기 위하여 규정된 시험전압의 50 ~ 70% 사이의 충격전압을 인가하며 이를 반파라 한다.

③ 재단파란 운전중 변압기에 뇌격전압 내습시 붕싱 등에서 방전이 일어나는 경우를 모의하는 것으로 적당한 방전 gap을 두어 파두 부분에서 외부방전이 일어나는 경우 변압기에 이상이 없는지를 시험한다.

④ 충격전압 인가는 권선에서는 반파1회, 재단파 2회, 전파 1회 순으로 인가하고, 중성점에서는 반파 1회, 전파 2회 순으로 인가한다.

(4) 판정기준

① 반파와 전파 시험파형의 전압 및 전류파형이 서로 일치하여야 한다.

② 2개의 재단파 파형은 서로 일치하여야 한다.

③ 반파와 전파, 2개의 재단파 파형이 각각 서로 설명할 수 없는 차이가 있는 경우나, 시험시 변압기 내부에서 이상음이 발생할 경우에는 불합격으로 한다.

**2) Separate source AC withstand voltage Test(상용주파내전압시험)**

운전중 일시적인 과전압에 대하여 권선간 및 권선과 대지간의 절연이 견디는 가를 확인하는 시험

**3) Short-duration induced AC withstand voltage test(유도내전압시험)**

운전중에 일시적인 과전압에 대하여 Turn(권선)간 및 Turn(권선)과 대지간의 절연이 견디는 가를 확인하는 시험



**1-3. 기력발전소의 열효율에 영향을 미치는 요소들에 대하여 설명하시오.**

답)

**1. 화력발전소의 열효율에 영향을 미치는 요소****1) 사용연료**

사용연료에 따라 화력발전소의 형식이 결정되며 사용연는 석탄, 중유·석유, 가스 등이 사용되고 있다. 열효율은 석탄화력, 가스화력, 중유·석유 화력 순으로 좋아진다.

**2) 사용증기**

사용증기의 온도와 압력이 높을수록 열낙차가 커져 열효율은 좋아진다.

**3) 복수기의 진공도**

복수기의 진공도가 낮을수록 배기 속도가 빨라지므로 열낙차가 커져 열효율은 좋아진다.

**4) 보일러의 형식**

관류형 보일러는 변압운전을 채용하여 주증기 밸브 손실 등을 줄이므로 열효율이 좋아진다.

**5) 추기단수 및 급수온도**

추기단수가 높을수록 급수온도가 높을수록 열효율이 좋다.

**6) 재열기의 사용 유무**

1단 재열보다는 2단 재열일 때가 열효율이 좋다.

**7) 공기량과 공기온도**

공기량이 많고 공기온도가 높을수록 열효율이 높다.

**8) 발전형식**

복합발전, 열병합 발전을 채용하면 열효율이 향상된다.

**9) 보일러, 터빈, 발전기 등의 기타 손실.**

#### 1-4. 철탁계탑공법의 개요 및 특징에 대하여 설명하시오.

답)

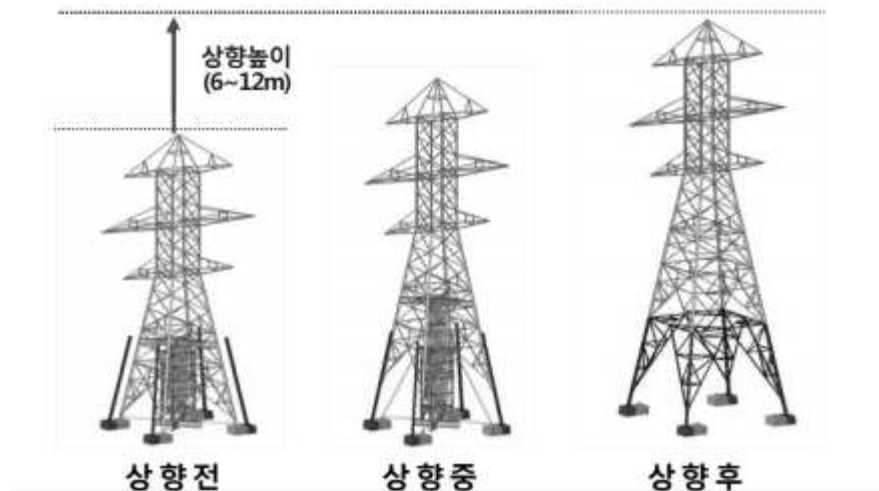
### 1. 개 요

철탁 계탑공법은 FTB 공법(Floating Tower body Bottom-up method)이라고 하며, 이는 구조물 등의 설치 제한, 철탁용지 확보 곤란 등으로 철탁의 추가 설치가 어려울 경우에 사용하는 방법으로, 전력선이 가선된 상태에서 임의의 높이까지 단기간에 계탑할 수 있는 방법으로 철탁의 지상부 전체를 밀어 올려 그 하부에 계탑재를 접합시키는 공법이다.

### 2. FTB 공법

계탑 대상철탁의 내측에 철주를 조립해서 이것으로 철탁을 밀어 올리기 위한 지지점 및 Guide로 사용하고, winch, wire rope, chain에 의해 철탁전체를 가선상태대로 밀어 올려서, 사전에 철탁기초에 연결되어 있는 계각부의 주주재에 접합하도록 한 것이다.

- 송전철탁에 전선이 매달린 상태에서 철탁을 해체하지 않고 철탁 인상장비를 이용하여 철탁을 일정높이 까지 상향시키는 공법



### 3. FTB 공법의 특징

- 1) 철탁의 강도, 형체에 관계없이 임의의 높이까지 계탑할 수 있다.
- 2) 가선상태에서 계탑할 수 있기 때문에 가공사, 가선로의 설치 및 이에 따른 이설공사, 발발침공사 등이 필요 없게 된다.
- 3) 가선선의 장력증가, 불평균장력의 발생, 애자련의 흐름, 점퍼의 형태변화 등이 허용치 이하로 된 경우에는 송전상태 대로 공사를 시행할 수 있다. 실제로는 상세한 전선장력, 실장 등의 변화를 계산하고 있기 때문에 미리 각종 조정을 행하고 있는 경우가 많다.

- 4) 특수한 공구, 장치를 이용하지 않아도 종래부터 송전선로공사로 사용되고 있는 공구를 사용해서 시공할 수 있다.
- 5) 밀어 올리는 장치는 약 100kgf이하의 중량으로 분해해서 운반할 수 있기 때문에 산간지나 중장비를 반입할 수 없는 장소에도 용이하게 적용할 수 있다.
- 6) 고소작업이 대략적으로 감소하기 때문에 안전성이나 작업성이 좋다.
- 7) 철탁의 계탑 전의 상태로부터 계탑 후에 옮기기까지 단시간이기 때문에 설비운영 및 작업면에서 안전하다.
- 8) 철탁부지 이외는 공사용지를 필요하지 않기 때문에 용지업무가 감소된다.
- 9) 기설철탁의 부재 및 기초를 유효하게 이용할 수 있다.

### 1-5. 지중케이블 냉각방식의 종류와 특징에 대하여 설명하시오.

답)

#### 1. 정의

지중 케이블의 송전용량(허용전류)을 증대시키기 위해서 냉각물질을 사용하여 케이블의 온도 상승을 억제하는 것을 케이블 냉각이라 한다.

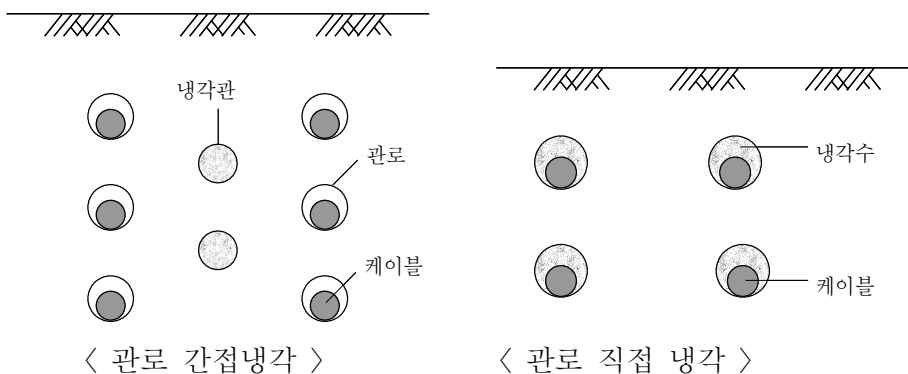
#### 2. 지중케이블 냉각방식의 종류와 특징

##### 1) 간접냉각방식

외부냉각이라고도 하며 케이블 주변의 토양이나 공기 등을 냉각하여 케이블 온도를 저하시키는 방법이다. 동일 장소에 다수의 케이블을 동시에 냉각시킬 수 있는 장점이 있다.

###### (1) 관로 간접냉각

냉각관을 직접 땅 속에 케이블과 병렬로 매설하여 냉각하는 방식으로 Cable과 수냉관 사이 열 저항이 커서 냉각효과가 크지 않다.



###### (2) 전력구 간접냉각

전력구 천장 또는 방재트러프 내에 냉각관을 설치하여 냉각하는 방법으로 냉수 제조설비, 냉각수 순환설비 및 감시설비 등으로 구성된다. 냉각효과는 크지 않다.

##### 2) 직접냉각방식

표면냉각방식이라고도 불리우는 이 방식은 케이블 외경 보다 큰 냉각관 안에 케이블을 설치하여 케이블 표면을 직접 냉각하는 방식으로 도체냉각 방식 다음으로 냉각효과가 높다.

###### (1) 관로 및 전력구 직접냉각

냉각관을 땅속 또는 전력구내에 설치하고 그 안에 케이블을 설치한 후 냉매(주로 물)를 순환시켜 케이블을 냉각하는 방식

###### (2) POF 케이블 유순환 방식

강관 안에 설치된 케이블을 충전된 절연유를 순환시켜 케이블을 냉각하는 방식

(3) 전력구 풍냉

냉각팬으로 전력구내 공기를 순환시켜 케이블을 냉각하는 방식으로 보통 타 냉각방식과 병행하여 사용된다.

**3) 도체냉각**

케이블 도체 내부에 냉각통로를 설치하고 냉매를 유통 시켜 케이블을 냉각하는 방법으로 냉각 효과는 매우 크지만 부속장치가 많이 필요하고 접속함 등의 설계가 매우 복잡하고 어렵다.

**4) 히트파이프 냉각**

온도 차이가 발생 시 증발과 응축 등의 열싸이클 변화를 하는 냉매를 밀폐된 파이프내에 넣고 파이프를 케이블 근처에 설치하여 냉각하는 방식이다.

(1) 케이블에서 발생하는 열의 일부를 파이프내로 흡수하고, 흡수된 열을 토양 또는 공기 중으로 이동·발산시켜 케이블의 온도 상승을 억제 한다.

(2) 이 방식은 변전소 인출부 등 국부적인 장소의 온도강하에 이용하고 있다.

# 1-6. 피뢰기 정격전압의 정의와 정격전압 결정시 고려사항에 대하여 설명하시오.

답)

## 1. 피뢰기 정격전압의 정의

### 1) 정의

그 선로단자와 접지단자 간에 인가할 수 있는 상용주파의 최대 허용전압(실효치)을 말하며 상용주파 전류를 끊고 피뢰기 단자간에 남는 전압으로 속류를 차단할 수 있는 전압을 말한다.

### 2) 관계식

$$V = \alpha\beta V_m [kV]$$

단)  $\alpha$  : 접지계수 (유효접지계통 : 0.75이하, 비유효접지계통 : 0.75초과)

$$\alpha = \frac{\text{고장시 건전상의 최대 대지전압}}{\text{최대 선간전압}}$$

$\beta$  : 여유계수 (유효접지계통 : 1.1, 비유효접지계통 : 1.15)

$$V_m : \text{계통 최고전압} \quad V_m = \frac{\text{공칭전압}}{1.1} \times 1.15$$

## 2. 정격전압 결정시 고려사항

### 1) 계통에서 생기는 지속성 이상전압

- (1) 만일 피뢰기에 정격이상의 상용주파전압이 인가되면 피뢰기의 누설전류가 커져 열폭주(Thermal Runaway)에 의해 피뢰기가 파손될 수 있다.
- (2) 따라서 피뢰기의 정격전압은 사고 시에도 건전상의 상용주파최대대지전압보다 높아야 한다.
- (3) 전력계통에서 상용주파과전압이 발생하는 원인은 지락사고, 부하의 돌연분리, 발전기의 과속, 공진, 인근 불평형 병렬 선로로부터의 유도전압 등 제요소가 있으나 이 모든 조건을 고려하여 피뢰기의 정격전압을 결정한다는 것은 실제로 불가능하다.
- (4) 1선지락 사고시에 피뢰기 설치점에 설치점에 나타나는 최고 전압의 실효치를 기준으로 하여 이것에 접지상태에 따른 유도를 고려하여 정격전압을 결정한다.
- (5) 지락사고시의 건전상의 최대 대지전압은 계통의 중성점 접지방식에 따라서 변화하는데 전력계통의 지락사고시 건전상의 최대 대지전압은 다음과 같다.

- ① 765kV 송전 계통 : 1.2 p.u.
- ② 345kV 송전 계통 : 1.35 p.u.
- ③ 154kV 송전 계통 : 1.35 p.u.

### 2) 피보호기기의 절연강도

**3) 계통 전체로서의 절연협조**

- (1) 피뢰기 제한전압은 피뢰기 정격전압에 2.6~3.2배로 선정되므로 절연협조 측면을 고려하여 피뢰기 정격전압을 선정한다.
- (2) 변전소에서 사용할 것인지 선로에서 사용할 것인지 사용 장소에 따라 보호기기가 달라지므로 이에 따라 피뢰기 정격전압을 적정하게 선정하여야 한다.

### 1-7. 전력계통의 특성해석을 위한 부하응답모델에 대하여 설명하시오.

답)

#### 1. 부하응답모델 개요

부하의 전압특성을 나타낸 모델을 부하응답모델이라 한다.

- 1) 부하 모션에서의 전압과 주파수 변동은 부하의 유효전력과 무효전력에 영향을 준다.
- 2) 부하 모션 전압이 제어함수로 주어질 경우 제어동작과 부하와의 관계를 파악하는 것이 필요하다.
- 3) 표현

$$P \propto V^m \quad P : \text{부하전력}, \quad V : \text{부하전압}$$

- 4) 특성

m 값이 작을수록 전압안정도 면에서 가혹해진다.

#### 2. 부하응답모델 종류

##### 1) 일정 임피던스 모델 ( $P \propto V^2$ )

- (1) 정의

부하의 P, Q는  $V^2$ 에 비례한다. 전압이 저하함에 따라 전압의 제곱으로 소비전력이 감소하는 특성을 가진다.

- (2) 관계식

$$Z = \frac{V}{I}, \quad W = VI^* = P + jQ, \quad V^*I = P - jQ, \quad V^* \times \frac{V}{Z} = P - jQ$$

$$\therefore Z = \frac{|V|^2}{P - jQ}, \quad P \propto V^2$$

##### 2) 일정 전류 모델 ( $P \propto V^1$ )

- (1) 정의

부하의 P, Q는  $V^1$ 에 비례한다. 전압이 저하함에 따라 소비전력도 저하 하는 특성을 가진다.

- (2) 관계식

$$W = VI^* = P + jQ, \quad V^*I = P - jQ, \quad I = \frac{P - jQ}{V^*} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2} \angle -\phi}{|V| \angle -\theta}$$

$$\therefore I = |I| \angle \theta - \phi, \quad V = |V| \angle \theta, \quad \phi = \tan^{-1} \frac{Q}{P}$$



### 3) 일정 전력 모델 ( $P \propto V^0$ )

(1) 정의

전압의 변화에 관계없이 소비전력은 일정하다. 전압이 저하하면 전류가 증대한다.

(2) 특징

중부하시 전압불안정 현상의 주원인이 된다. (인버터 부하, 에어컨등)

(3) 관계식

- ①  $P = \sqrt{3} VI \cos\theta$ 에서 전압이 저하하면 전류가 증가해서 일정전력을 유지한다.
- ② 그 결과  $\Delta V = \sqrt{3} I(R \cos\theta + X \sin\theta)$  전압강하 식에서 전류증대로 전압강하가 증대한다.
- ③ 전압강하 증대로 전압이 저하하면 더욱더 전류가 증대한다.
- ④ 위 과정을 되풀이하면 수전단에는 전압이 모두 전압강하로 돼서 전압붕괴가 진행된다.

### 1-8. 3전류계법으로 단상전력을 측정하는 방법을 설명하시오.

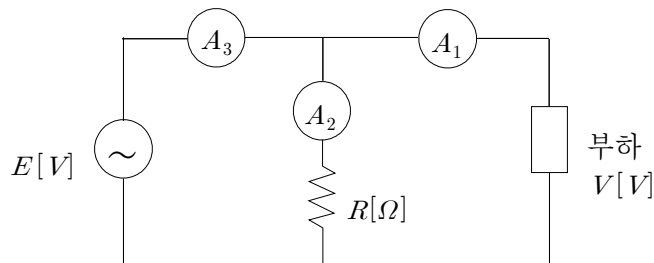
답)

#### 1. 3전류계법

3개의 전류계와 하나의 저항을 사용하여 단상 교류전력을 측정하는 방법으로서  $P = I^2 R$  형태로 제일 큰 전류  $A_3$ 에서 낮은 전류  $A_2, A_1$ 을 빼는 형태로 구성한다.

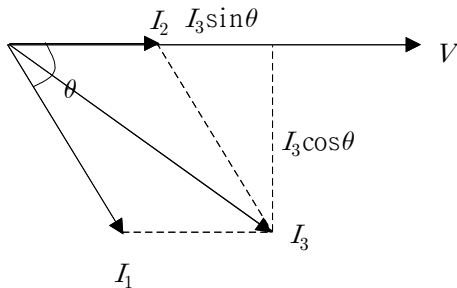
#### 2. 단상전력을 측정하는 방법

1) 다음과 같은 회로를 구성한다.



2) 전류계  $A_3, A_2, A_1$ 을 측정한다.

3) 벡터도



4) 부하의 유효전력 P 측정

$$P = VI_1 \cos \theta$$

$$I_3 = I_1 + I_2$$

$$I_3^2 = (I_2 + I_1 \cos \theta)^2 + I_1^2 \sin^2 \theta$$

$$= I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \theta + I_1^2 \cos^2 \theta + I_1^2 \sin^2 \theta$$

$$= I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \theta + I_1^2$$

$$\therefore \cos \theta = \frac{I_3^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1 I_2}$$

$$P = RI_2 \times I_1 \times \frac{I_3^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1 I_2} = \frac{R}{2} (I_3^2 - I_1^2 - I_2^2) \text{로 계산에 의해 구할 수 있다.}$$

# 1-9. 전력수급 비상시 시행하는 순환단전 방법 및 제외 대상시설에 대하여 설명하시오.

답)

## 1. 전력수급 비상시 시행하는 순환단전 방법

### 1) 순환단전이란

전기는 안정적 공급을 위해 일정 수준의 여유 공급력(이른바 ‘예비전력’)을 갖추어야 하고 이를 위해 대단위 광역정전이 되는 “블랙아웃”을 막기 위해 미리 정해 놓은 순서에 의해 단전 시행하는데 이를 순환정전이라 한다.

2) 국가 중요시설 등을 제외한 송배전선로를 50MW 단위로 그룹화하여, 예비 발전량이 1,00MW 미만이 되면 순환단전 계획에 의거 1시간씩 선로를 차단함.

3) 차단 대상선로 우선순위 선정기준

순위(그룹)	선 정 기 준
1순위(X)	상가, 주택, 아파트 등 일반용 및 주택용 고객 공급선로
2순위(Y)	산업용 일반선로, 공단선로, 산업용 22.9kV 전용선로
3순위(Z)	정전민감고객(농·어·축산업, 안전시설), 66kV이상 전용선로
차단제외 대상	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 국가주요시설 : 정부기관, 군부대, 방위산업, 에너지 시설</li> <li>• 국가경제분야 : 중요 연구기관, 금융(본점, 전산센터)</li> <li>• 국민안전분야 : 교통시설/터미널, 병원·요양병원, 수자원</li> <li>• 국민생활분야 : 언론방송, 중요 통신시설, 전산센터, 우편집중국</li> <li>• 기 타 : 긴급절전 A형 약정고객(기준부하 대비 20%이상 감축)</li> </ul>

## 2. 차단 제외 대상시설

### 1) 차단 제외 대상시설 세부기준

#### 국가 중요시설

구 분	세 부 선 정 범 위
중앙 및 지자체 행정기관	중앙 정부기관, 법원(등기소), 검찰청, 경찰청 및 경찰서, 지자체 시·군·구청, 소방서, 세무서, 기상대, 교도소
국군 및 유엔군 주요부대	국군 주요부대(사단급 이상), 유엔군 주요부대, 접경지역 군부대, 주요기지(레이더 등), 작전 및 경계, 통신 및 군수지원업무를 수행하는 주요 중대급 부대
중요 방위산업 시설	전투기구 생산업체(항공기, 함선, 탱크, 총, 특수전자무기 등)
전력시설	발전소, 변전소, 송배전설비 관리기관
비행장(공항)	국제공항, 국내공항, 육상비행장
항만시설	무역항
에너지(저장) 시설	가스, 석유 등 처리·저장시설

## 국가 경제분야

구 분	세 부 선 정 범 위
중요 연구기관	국가 연구시설, 주요 민간연구기관, 주요 대학연구기관
금융기관	금융기관 본점 및 전산센터

## 국민 안전분야

구 분	세 부 선 정 범 위
의료기관	종합병원*, 병원**(치과,한방,요양 포함), 수술실 있는 병원 및 의원, 요양병원, 혈액원, 응급의료정보센터 <주1> *종합병원(100개 이상 병상), **병원(30개 이상 병상) <주2> 단순 요양원, 헌혈카페는 차단대상 포함
교통	전철 및 철도 공급전력, 주요터미널(버스, 선박), 터널, 고속도로IC(요금정산소), 화물컨테이너 기지
수자원, 탄광시설	취수 및 정수시설, 하수처리시설, 다목적댐, 석탄채굴광산, 빗물펌프장, 양수장/배수장 등

## 국민 생활분야

구 분	세 부 선 정 범 위
통신 및 언론기관	신문사, 방송국, 주요 송신·중계소, 국가기간 전산센터, 전화국, 우편집중국, 중요 통신시설(핵심국사 등)

## 기타 차단제의 대상

- 긴급절전A형(CBL 20%) 약정고객
- 육지와 미연계된 도서지역(섬)내 배전선로
- 발전소 연계선로, 송전선로 계통선로의 T분기로 고객 공급선로
- NDIS 미준공, 무부하 선로

**1-10. 우리나라에서 실시하고 있는 중장기 배전계획의 절차를 설명하시오.**

답)

**1. 중장기 배전계획의 절차****1) 부하 예측**

- (1) 배전계획 지역에 대한 향후 10년 정도의 부하예측을 시행
- (2) 부하예측기법은 과거 년도의 추세 Trend를 예측하여 미래에 대한 증감 곡선을 추이

**2) 부하 밀도 작성**

배전계획지역에 대해 관리구별로 현재와 미래의 부하밀도 및 부하밀도 지도를 작성

**3) 부하 밀도 분포 조정**

거시적 부하 예측치와 관리구별 부하밀도의 합계치를 비교하여 현저한 차이가 있을 때는 지역 전체를 예측한 거시적 부하 예측 치에 가까운 값으로 관리구별 전력을 조정

**4) 배전방식 결정**

목표연도의 공급력과 신뢰도를 고려하고 배전방식, 간선선로의 공급구역을 결정

**5) 선로 경과지 결정**

변전소의 이용률 및 신설위치, 배전선로의 손실과 전압강하를 최소화하는 방향으로 경과 가능한 후보지중 최적의 선로 경과지를 결정

**6) 설비 계획 수립**

매년의 수요에 대응하여 설비를 확충하면서 목표연도의 설비에 이르기까지 단계별 계획을 수립

**7) 사업목표 수립 및 예산 배정**

시행단계부터 목표연도에 이르기까지 매연도의 공사내용을 정리하고 예산을 산정

### 1-11. 태양광발전시스템에서 독립형과 계통연계형을 비교 설명하시오.

답)

#### 1. 태양광발전시스템에서 독립형과 계통연계형을 비교 설명

##### 1) 독립형

###### (1) 정의

필요한 전력을 전적으로 시스템 자체적으로 공급하며 계통과 연계되지 않는 시스템.

###### (2) 특징

- ① 독립적이기 때문에 전력 부족시 정전을 피할 수 없다.
- ② 시스템이 연계형에 비하여 단순하므로 계통사고 등의 영향을 적게 받고 부속장치가 경감되어 경제적이다.

##### 2) 계통 연계형 시스템

태양광 발전출력 부족시 상용전원과 연계하여 공급받는 시스템

###### (1) 백업(Back-up)형

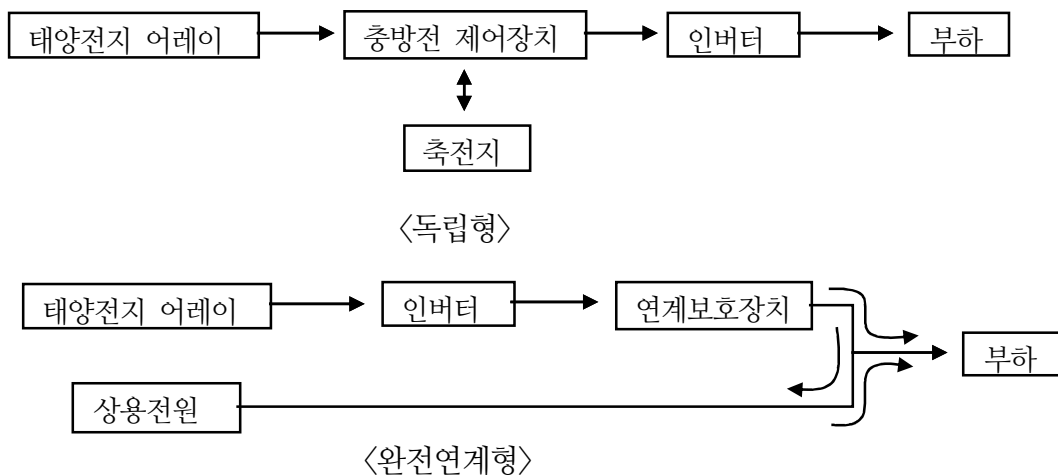
남는 전기를 축전지에 저장

###### (2) 완전 연계형

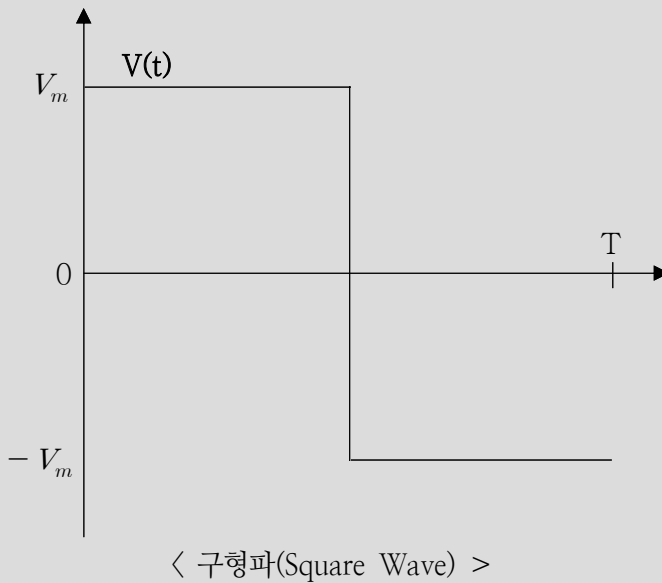
남는 전기를 상용전원으로 공급

###### (3) 특징

- ① 남는 전기를 상용전원에 공급하므로 전력계통에 예비력등을 경감시키고 기여도가 있다.
- ② 연계장치 등이 복잡하여 가격이 비싸고 계통사고의 영향을 받는다.
- ③ 전력이 부족해도 계통으로부터 전력을 공급받으므로 안정적인 전원구성이 가능하다.



1-12. 파형률(Form Factor)과 파고율(Crest Factor)에 대하여 설명하고, 아래 파형에 대한 파형률과 파고율을 구하시오.



답)

### 1. 파고율(Crest Factor)

#### 1) 정의

신호 파형의 최대값을 신호의 실효값(RMS 값)으로 나눈 값

#### 2) 의미

날카로움의 정도의 비율

#### 3) 활용

측정대상 신호에서 임펄스와 같은 충격성분 또는 불규칙적인 랜덤잡음과 같은 성분이 얼마나 포함되는지 알기위한 객관적 수치로 활용

### 2. 파형률(Form Factor)

#### 1) 정의

신호 파형의 실효값을 시간 평균값으로 나눈 값

#### 2) 의미

신호파형에 포함된 출력이는 성분의 비율

### 3. 파형률과 파고율 계산

#### 1) 구형파의 실효값 계산

(1) 실효값의 정의 식

$$V_{\text{실효}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt}$$

(2) 구형파의 실효값

$$V_{\text{실효}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\frac{T}{2}} V_m^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^T (-V_m)^2 dt \right\}} = \sqrt{\frac{V_m^2}{T} \times T} = V_m$$

실효치와 최대치는 같아진다.

(3) 평균값의 정의식

$$V_{\text{평}} = \frac{1}{T} \int_0^T |V(t)| dt$$

(4) 구형파의 평균값

$$V_{\text{평}} = \frac{1}{T} \left\{ \int_0^{\frac{T}{2}} |V_m| dt + \int_{\frac{T}{2}}^T |-V_m| dt \right\} = \frac{V_m}{T} \times T = V_m$$

평균치와 최대치는 같아진다.

(5) 구형파의 파형률

$$\text{파형률} = \frac{\text{실효값}}{\text{평균값}} = \frac{V_m}{V_m} = 1$$

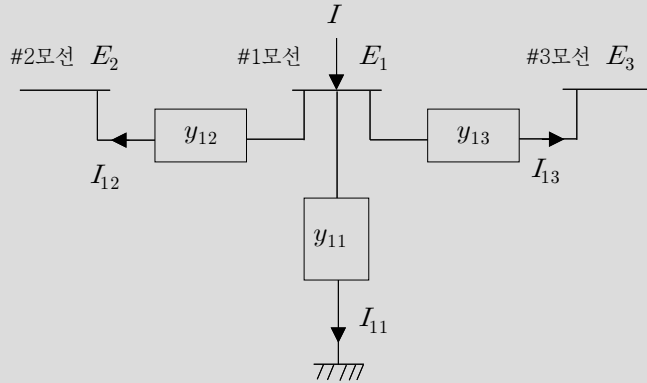
(6) 구형파의 파고율

$$\text{파고율} = \frac{\text{최대값}}{\text{실효값}} = \frac{V_m}{V_m} = 1$$



1-13. 전력계통을 망 방정식보다 모선방전식으로 표현하는 이유를 설명하고, 다음 계통에 대하여 3단자 모선방정식의 어드미턴스  $Y_{11}$ ,  $Y_{12}$ ,  $Y_{13}$ 를 구하시오.

(단, 계통 내부에는 기전력이 포함되지 않고, 충전커패시턴스, 전력콘데서 등은 부하로 취급)



답)

## 1. 전력계통을 망 방정식보다 모선방전식으로 표현하는 이유

### 1) 회로의 상태를 나타내는 변수

- (1) 모선방정식 : 각 모선전압
- (2) 망 방정식 : 각 망에 흐르는 망전류

### 2) 방정식의 수

- (1) 망 방정식 수  $m$

$$m = b - n + 1$$

단,  $b$  = 주어진 회로의 지로의 수,  $n$  : 모선의 수

- (2) 모선 방정식의 수

$$m' = n - 1$$

- (3) 망 방정식과 모선 방정식의 수의 차  $d$

$$d = m - m' = b - 2n + 2$$

망 방정식 수가 모선 방정식 수보다  $b - 2n + 2$  만큼 많아진다.

### 3) 전력계통을 망 방정식보다 모선방전식으로 표현하는 이유

- (1) 일반적인 전력 계통에서는 각 모선과 대지간에 발전기, 부하, 충전캐패시턴스 등의 대지지 로가 있고, 또 모선과 모선사이에 송전선, 변압기 등의 지로가 있기 때문에  $b > 2$  로 되어 모선방정식으로 표현하는 것이 망방정식으로 표현하는 것보다 방정식의 수가 적어진다.
- (2)  $Y_{bus}$  행렬을 복잡한 계산을 하지 않고 바로 직관적으로 작성할 수 있고, 또 송전선의 접속 상태 등이 변경되었을 때 쉽게 회로방정식을 변경할수 있어 모선방정식을 사용한다.

**2. 3단자 모선방정식의 어드미턴스 계산****1) 키르호프의 전류법칙**

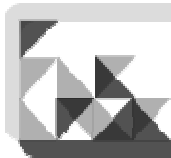
$$\begin{aligned}
 I &= I_{11} + I_{12} + I_{13} \\
 &= E_1 y_{11} + (E_1 - E_2) y_{12} + (E_1 - E_3) y_{13} \\
 &= E_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) + E_2 (-y_{12}) + E_3 (-y_{13})
 \end{aligned}$$

**2)  $I = YE$ 로부터**

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13}$$

$$Y_{12} = -y_{12}$$

$$Y_{13} = -y_{13}$$



## 제 2교시 문제풀이

2-1. 동기발전기의 병렬 운전조건이 일치하지 않을 때 발생하는 문제점에 대하여 설명하시오.

답)

### 1. 동기 발전기 병렬운전 조건

- 1) 기전력의 크기가 같아야 한다.
- 2) 기전력의 위상이 같아야 한다.
- 3) 기전력의 주파수가 같아야 한다.
- 4) 기전력의 파형이 같아야 한다.
- 5) 상회전 방향이 같을 것.

### 2. 불일치 시 일어나는 현상

#### 1) 발생 전압의 주파수가 같을 것

- (1) 발생하는 기전력의 주파수가 서로 다르면 발전기의 단자 전압이 심하게 진동하고, 이 전압의 최대값은 각 발전기 전압의 2배에 이르게 된다.
- (2) 따라서, 이와 같은 전압을 사용하여 병렬운전을 하면 발전기의 출력이 주기적으로 요동하고 권선은 비정상적으로 가열된다.
- (3) 이 진동 전압을 없애기 위해서는 각 발전기의 속도를 조정하여 모두 정격 주파수가 발생 되도록 하여야 한다.

#### 2) 발생 전압의 크기가 같을 것

- (1) 동기 발전기에서 발생하는 기전력의 크기가 서로 다르면 각 발전기 내부에 순환 전류가 흐르게 된다.
- (2) 이 때, 흐르는 순환 전류는 낮은 전압의 발전기 전압은 높여 주고 높은 전압의 발전기 전압은 낮추어서 같게 하는 작용을 한다.
- (3) 또한, 이 전류는 역률이 거의 0인 무효전류이므로 출력에는 관계가 없고 단지 두 발전기의 내부를 순환하여 흘러서 전기자 권선에 저항손을 생기게 한다.
- (4) 이 순환 전류를 무효 횡류라고 하며, 이것을 없애기 위해서는 발전기의 계자 전류를 조정하여 발생 전압의 크기를 같게 하면 된다.

#### 3) 발생 전압의 위상이 같을 것

- (1) 동기 발전기에서 발생하는 전압의 위상이 서로 다르면 위상차에 해당하는 순환 전류가 흐르며, 이 순환 전류를 유효 횡류라 한다.
- (2) 위상이 일치하지 않은 상태에서 병렬 운전을 하면 위상이 앞선 발전기는 부하의 증가를 가져와서 회전 속도가 감소하게 되고, 위상이 뒤진 발전기는 부하의 감소를 가져와서 발전기의 회전 속도가 상승하게 된다.

(3) 두 발전기의 위상에 대한 일치는 동기 검정 등으로 확인한다.

(4) 순환 전류가 흐르는 것을 막기 위해서는 동기 검정 등을 이용하여 위상의 일치를 확인한 다음 동기 발전기를 모선에 접속하여야 한다.

#### 4) 기전력의 파형이 같을 것

동기발전기에서 발생하는 파형이 다르면 고조파 무효순환 전류 등으로 병렬운전이 불가능해지며 정현 파가 아닌 왜형 파는 심하면 동기조건에서 이탈하게 된다.

#### 5) 상회전 방향이 같을 것

상회전 방향이 다르면 등가적으로 단락상태가 되어 매우 큰 단락전류가 흘러 발전기가 소손된다.

## 2-2. 전력구 풍냉시스템 송풍방식의 종류, 특징 및 적용기준을 설명하시오.

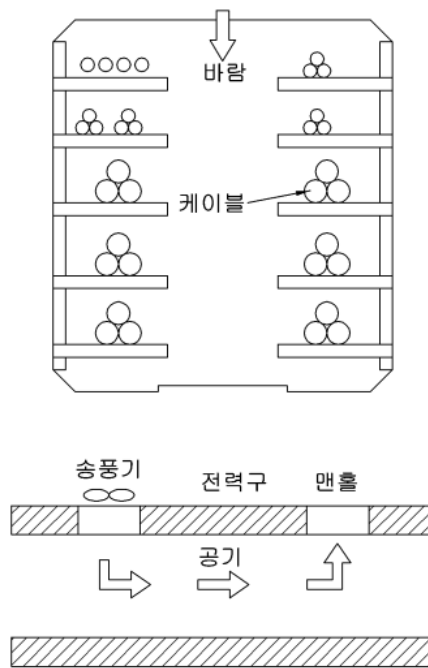
답)

### 1. 전력구 냉각시스템의 정의 및 적용기준

전력구 내부에 설치된 케이블에서 발생한 열에 의하여 전력구의 내부온도가 관련법령에 의거 규정된 온도인  $37^{\circ}\text{C}$ 를 초과하고 허용전류가 감소됨에 따라 전력구를 냉각하여 송전용량을 확보하고 추가적인 온도제어를 통하여 송전용량을 증대시키는 시스템을 말한다.

### 2. 전력구 풍냉 시스템 종류

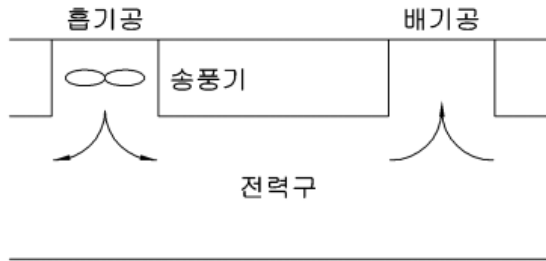
전력구에 팬등을 이용하여 외부공기를 전력구에 유입시켜 케이블을 냉각한 후 배기하여 냉각하는 시스템으로 그 종류는 편단강제송풍, 양단강제송풍, 중간강제송풍, 양단중간강제송풍 및 덕트송풍 등이 있다.



< 전력구 풍냉시스템 >

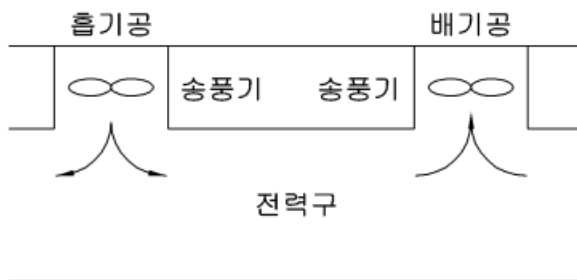
## 1) 편단 강제 송풍

송풍기나 배풍기가 하나만 두고 강제로 공기를 송풍하거나 배기하는 방식



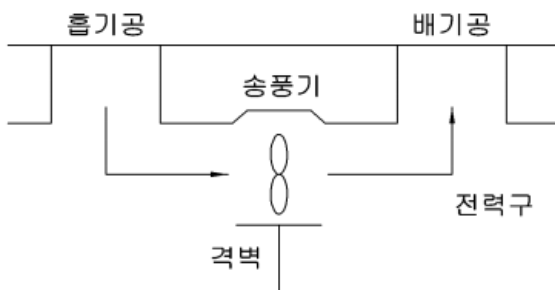
## 2) 양단 강제송풍

양단에 송풍기와 배풍기를 두어 강제급기 강제 배기하는 방식



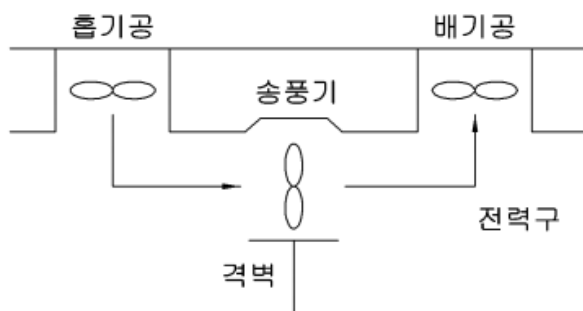
## 3) 중간 강제송풍

중간에 송풍기를 두어 자연급기 자연배기 되도록 하는 방식



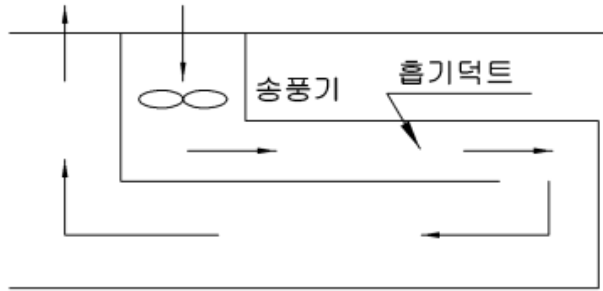
## 4) 양단 중간 강제송풍

양단과 중간에 송풍기를 두어 강제급기 강제배기 하는 방식



### 5) 덕트 송풍

덕트를 이용하여 강제급기 자연배기 하는 방식



### 3. 전력구 풍냉 시스템의 특징

- 1) 시스템이 단순하고 유지비용 등이 적게 든다.
- 2) 냉각효과가 크지 않다.
- 3) 여름과 같이 대기 온도가 높은 경우에는 대기를 이용한 냉각 시스템은 작동 효율이 극히 낮은데, 이는 외부 공기 자체가 고온 다습하므로 다량의 외부 공기를 순환시켜도 전력구 내부의 온도를 외기 온도 이하로 유지하는 것이 어렵기 때문이다.
- 4) 전력구의 출입 구간이 상대적으로 긴 경우에도 종래의 전력구 냉각 시스템은 효과적으로 작용하지 못하였다. 이는 종래 채용되고 있는 송풍관과 배풍관을 이용하여 작업자가 전력구 내부로 이동하는 출입통로로 사용하므로 출입통로의 길이가 긴 경우 원활한 공기의 순환이 이루어지기 어렵기 때문이다.
- 5) 전력구 내부의 온도에 따라 공기의 순환 유량을 증가시키는 경우 전력구 내부에서 빠른 풍속의 유동이 발생하여 전력구의 유지, 보수 및 관리 활동을 저해한다는 문제점이 있다.
- 6) 수냉식과 병용하여 사용하여 냉각효과를 높인다.
- 7) 냉매(얼음, 냉매가스)를 사용하는 냉각시스템에 공기를 차압계하여 간접적으로 사용하여 효과를 높인다.

**2-3. 해저 케이블 경과지 조사 시 포설루트의 필요조건 및 조사항목을 설명하시오.**

답)

**1. 정의**



## 2-4. 전력품질의 정의와 평가지표에 대하여 설명하시오.

답)

### 1. 전기품질의 정의

- 1) 전기품질이란 규정된 전압과 주파수를 유지율을 나타내며 이러한 확실한 품질로 정전없이 공급하는 것을 신뢰도라 한다.
- 2) 일반적으로 전통적인 의미에서 전력품질은 주파수 유지율, 규정전압 유지율 및 정전 등 3대요소로 규정하였으나, 최근 정밀기기, 정보화기기, 자동화 생산시설 및 컴퓨터 등 극히 짧은 시간에 나타나는 파형변화와 전압변화에 민감한 기기들의 보급이 증대되고 있으며, 태양광, 풍력 등 전력품질을 유지하기 어려운 신재생에너지원 보급이 확대 되고 있으므로, 기존에는 문제가 되지 않았던 고조파, 플리커, 순간전압변동, 전압불평형, 순간정전 및 서지(surge) 등과 같은 새로운 개념의 전력품질에 대한 규정 및 관리가 필요하다.

### 2. 전기품질 평가지표

IEEE-1159에서 전력품질을 표준화하였으며, 과도특성, 단주기변동, 장주기변동 및 파형왜곡의 4가지 주요 특성과 전압변동, 주파수 변동 등으로 구분되어 있다.

#### 1) 과도특성(Transient characteristic)

항 목		일반 유형	구분	크기
임펄스 (Impulsive)	나노 Sec (Nano second)	5 ns 상승	< 50 ns	-
	마이크로 Sec. (Micro second)	1 ms 상승	50 ns - 1 ms	-
	밀리 Sec. (Mili Second)	0.1 ms 상승	> 1 ms	-
진동 (Oscillatory)	저주파수 (Low Freq.)	< 5 kHz	03-50 ms	0~4 pu
	중간주파수 (Medum Freq.)	5~500 kHz	20 ms	0~8 pu
	고주파수 (High Freq.)	0.5~5 MHz	5 ms	0~4. pu

#### 2) 단주기 변동(Short duration variation)

항 목		구 분	크 기
순시 (Instantaneous)	순간전압강하 (Sag)	0.5 ~ 30 cycle	0.1~0.9 pu
	순간전압상승 (Swell)	0.5 ~ 30 cycle	1.1~1.8 pu

항 목		구 분	크 기
순 간 (Momentary)	정전 (Interruption)	30 cycle ~ 3 s	<0.1 pu
	순간전압강하 (Sag)	30 cycle ~ 3 s	0.1~0.9 pu
	순간전압상승 (Swell)	30 cycle ~ 3 s	1.1~1.4 pu
일 시 (Temporary)	정전 (Interruption)	3 s ~ 1 min	<0.1 pu
	순간전압강하 (Sag)	3 s ~ 1 min	0.1~0.9 pu
	순간전압상승 (Swell)	3 s ~ 1 min	1.1~1.2 pu

## 3) 장주기 변동(Long duration variation)

항 목	구 분	크 기
영구 정전 (Sustained Interruption)	> 1 min	0.0 pu
저전압 (Under Voltage)	> 1 min	0.8~0.9 pu
과전압 (Over Voltage)	> 1 min	1.1~1.2 pu

## 4) 파형왜곡(Waveform distortion)

항 목	일반 유형	구 분	크 기
DC 오프셋 (DC Offset)		정상상태	0 ~ 0.1 %
고조파 (Harmonics)	0 ~ 100차 고조파	정상상태	0 ~ 20 %
차수간 고조파 (Inter Harmonics)	0~6 kHz	정상상태	0 ~ 2 %
나침 (Notching)		정상상태	
노이즈 (Noise)		정상상태	0 ~ 1 %

## 5) 전압불평형(Voltage unbalance/ Imbalance)

항 목	구 분	크 기
전압불평형 (Voltage Unbalance)	정상 상태	0.5~2 %

## 6) 전압변동(Voltage fluctuation, Flicker)

항 목	일반 유형	구 분	크 기
전압변동 (Voltage fluctuation)	< 25 Hz	간헐적	0.1 ~ 7 %

## 7) 주파수 변동(Power frequency variation)

항 목	구 분
주파수 변동 (Power frequency Variation)	< 10 S

2-5. 다음과 같은 연료비 특성을 가진 2대의 발전기로 구성된 계통이 있다.

$$F_1 = 0.01P_{G1}^2 + 4P_{G1} + 8000[10^3 \text{원/Mwh}]$$

$$F_2 = 0.03P_{G2}^2 + 2P_{G2} + 10000[10^3 \text{원/Mwh}]$$

부하  $P_R$ 이 50[MW]일 때, 다음조건에서 연료비를 비교하시오.

- 1)  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 균등하게 부하  $P_R$ 을 분담할 경우
- 2)  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 경제부하배분 출력으로 부하  $P_R$ 을 분담할 경우

답)

1.  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 균등하게 부하  $P_R$ 을 분담할 경우

- 1)  $P_{G1} = 25[MW]$ ,  $P_{G2} = 25[MW]$
  - 2)  $F_1 = 0.01 \times 25^2 + 4 \times 25 + 8000[10^3 \text{원/Mwh}] = 8,106.25 [10^3 \text{원/Mwh}]$
  - 3)  $F_2 = 0.03 \times 25^2 + 2 \times 25 + 10000[10^3 \text{원/Mwh}] = 10,068.75 [10^3 \text{원/Mwh}]$
  - 4) 총연료비
- $$F = 8106.25 + 10068.75 = 18,175 [10^3 \text{원/Mwh}]$$

2.  $P_{G1}$ ,  $P_{G2}$ 가 경제부하배분 출력으로 부하  $P_R$ 을 분담할 경우

1) 수급 조건

$$P_{G1} + P_{G2} = 50$$

2) 목적 함수

$$F = F_1 + F_2$$

3) 평가함수

$$\Phi = F_1 + F_2 - \lambda(P_{G1} + P_{G2} - 50)$$

4) 연료비 최소조건

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_{Gi}} = 0$$

$$\frac{dF_1}{dP_{G1}} - \lambda = 0, \quad \frac{dF_2}{dP_{G2}} - \lambda = 0$$

$$\therefore \lambda = \frac{dF_1}{dP_{G1}} = \frac{dF_2}{dP_{G2}}$$

## 5) 중분 연료비 계산

$$\lambda = 0.02P_{G1} + 4 = 0.06P_{G2} + 2$$

$$P_{G1} = \frac{\lambda - 4}{0.02}, P_{G2} = \frac{\lambda - 2}{0.06}$$

$$\frac{\lambda - 4}{0.02} + \frac{\lambda - 2}{0.06} = 50$$

$$\lambda = 4.25$$

## 6) 각 발전기 출력

$$P_{G1} = \frac{4.25 - 4}{0.02} = 12.5$$

$$P_{G2} = \frac{4.25 - 2}{0.06} = 37.5$$

## 7) 경제부하배분 했을 때 총 연료비

$$(1) F_1 = 0.01 \times 12.5^2 + 4 \times 12.5 + 8000 [10^3 \text{원/Mwh}] = 8,051.56 [10^3 \text{원/Mwh}]$$

$$(2) F_2 = 0.03 \times 37.5^2 + 2 \times 37.5 + 10000 [10^3 \text{원/Mwh}] = 10,117.19 [10^3 \text{원/Mwh}]$$

(3) 총연료비

$$F = 8,051.56 + 10,117.19 = 18,168.75 [10^3 \text{원/Mwh}]$$

(4) 연료비 차액

경제부하배분 했을 때가  $\Delta F = 18,175 - 18,168.75 = 6.2 [10^3 \text{원/Mwh}]$  만큼 절약된다.

**2-6. 우리나라의 일반적인 배전계통 배전전압을 22.9[kV-Y] 3상4선식 다중접지방식으로 선택한 기술적, 경제적 이유에 대하여 설명하시오.**

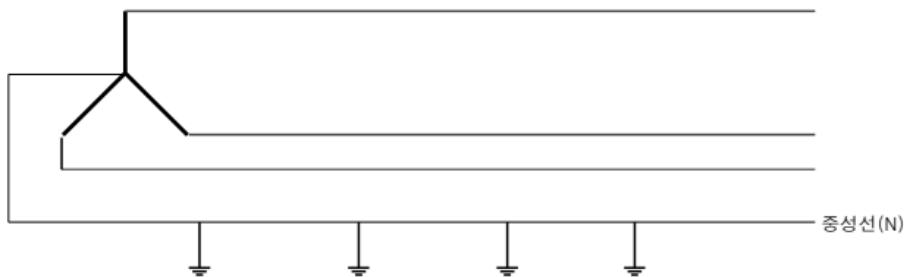
답)

**1. 다중 접지방식이란**

**1) 정의**

변압기 중성점에서 중성선을 뽑은 후 일정간격마다 접지를 시행한 방식

**2) 개념도**



**2. 22.9kV - y 다중접지방식으로 선택한 기술적, 경제적 이유**

**1) 우리나라 배전계통**

- (1) 우리나라 배전계통전압은 1917년 당시 경성전기주식회사가 3.5kV를 채택한 이래 3.3kV를 표준으로 적용해 6.25전쟁 후까지 이어져 왔다. 그 후 전란복구로 전력수요가 급증함에 따라 전력설비의 용량부족으로 과다한 전압강하와 전력손실이 발생해 설비보강이 시급하게 됐다.
- (2) 이를 해결하고자 경제적인 설비보강 방안을 검토한 결과 당시 미국 등 선진국에서 사용하던 3상 4선식 중성선 다중접지 5.7kV 배전방식으로 승압하면 3.3kV와 비교했을 때 기존 전선을 그대로 이용하면서도 설비용량을 증가시킬 수 있는 이점이 있어 이 방식을 채택하기로 결정하고 1957년 11월 20일에 준공된 오니산리 변전소의 강화 배전선로를 시초로 5.7kV 배전계통전압을 확대 적용하게 됐다.
- (3) 이후 3상 4선식 5.7kV 다중접지 방식에 대해 통신선의 전력유도 영향과 선로 보호상의 문제점이 지적돼 지난 1960년 1월 남부산 변전소 관내에서는 3상 5선식 5.7kV 저압측 다중접지 방식을 채택하기도했다. 하지만 이 방식 역시 중성선의 2중 가선에 따른 문제점 및 전력유도 영향의 폐단이 사라지지 않아 배전계통전압은 6.6kV 비접지 방식으로 승압방향이 변경됐다.
- (4) 3.3kV, 5.7kV 배전방식은 그 뒤 잇따른 6.6kV, 11.4kV, 22.9kV 배전계통전압 승압 검토과정에서 기존 기자재 활용방침 등에 따라 일부 선로가 남아있다가 3.3kV는 1986년, 5.7kV는 1988년에 각각 승압이 완료됐다.
- (5) 특히 1962년 제1차 전원개발 5개년 계획을 수립하면서 모든 배전용 기자재를 6.9kV급으로 사용키로 결정함에 따라 이때부터 배전계통전압의 승압은 6.6kV 비접지 방식을 적용하게 됐다.

- (6) 제1차 5개년 계획 기간 중에 11.4kV 또는 22.9kV 승압이 거론되면서 6.6kV로의 승압은 재승압의 우려가 있다고 해 활발히 추진되지 못했다. 1970년을 전후해 전력수요가 급증하고 농어촌 전기공급사업이 확대되는 반면 22.9kV 승압을 위한 송배전공사의 외자재 확보 계획이 뒤따르지 못하자 6.6kV 승압은 전국적인 규모로 추진되기에 이르렀다.
- (7) 6.6kV배전선로는 1978년 500회선을 최고점으로 1981년에는 349회선으로 축소됐으며 지난 2006년 12월 서울지역 6.6kV 배전선로가 최종 22.9kV-y로 승압되면서 40여년간 6.6kV 배전계통전압은 대단원의 막을 내리게 됐다.
- (8) 3사 통합 후 추진된 배전계통전압의 5.7kV 또는 6.6kV 승압만으로는 급증하는 전력수요 성장을 뒷받침하기에 어려움이 있었다. 공급능력 부족과 전압강하 문제를 해결을 위해 1963년부터 대책 마련을 위한 논의가 있었다.
- (9) 국제기구나 미국의 기술용역단으로부터 여러 제의가 있었으며 그중 EBASCO의 제시안이 향후 배전계통전압 승압에 있어 주요한 골격을 이루게 됐다. 이는 3.3kV, 6.6kV 보다 경제적인 11.4kV 또는 22.9kV 다중접지방식으로 승압하자는 것이 골자였으며 1차 AID송배전 차관사업에 반영됐다.
- (10) 1차 AID차관사업의 자재사양 작성 및 공사의 종합감리를 위한 기술용역계약이 1965년 3월14일 한전과 미국의 Burns & Roe사간에 이뤄져 구체적으로 승압지역 및 전압을 검토했다. AID 사업시행에 앞서 시범적으로 대구 약목 변전소의 22kV-△계통에 접지용 변압기를 설치하고 기존 22kV 송전선 일부구간을 배전선화해 1965년 10월 인근 4개 부락을 22.9kV-y 배전방식으로 공급하는데 성공했는데 이것을 최초의 22.9kV 배전선로로 볼 수 있다.

## 2) 기술적, 경제적 이유

- (1) 3상 4선식 배전방식은 접지방식에 따라 비접지 방식, 단일 직접접지방식, 저항접지방식, 다중접지방식으로 분류된다. 비접지방식은 1선 지락고장시 건전상의 선간전압이 상승하고 이를 대비하기 위한 기기절연비용이 비싼 단점이 있고, 단일 접지방식은 1선 지락 고장시 단락 고장만큼 큰 고장전류가 흐르며 고·저압 혼촉시 저압선의 전위상승이 커지는 문제점이 있다.
- (2) 다중접지방식은 1선 지락시 건전상의 전위상승이 극히 작아(상전압에 대한 상승률 10% 이하) 기기의 대지 절연을 저감시킬 수 있어 단절연이 가능하고 절연협조가 용이하다.
- (3) 고·저압 혼촉시 저압측 전위상승이 다른 방식에 비해 비교적 작으며 선로에 Recloser 등 보호기기를 설치해 고장 구간을 분리·제한하는 방법을 사용할 수 있기 때문에 공급신뢰도를 향상시킬 수 있다.
- (4) 당시 송배전 계통전압인 154/66/22/3.3kV를 장차 154/22.9kV로 개선함으로써 송전계통의 간소화를 기할 수 있어 경제적 이었다.
- (5) 전력수요 증가에 따른 설비의 공급능력 확충과 인접 계통간 부하절체에 따른 공급신뢰도 향상.
- (6) 통신선의 전력유도영향에 대하여 지중선로에 차폐효과가 우수한 CNCV 케이블을 사용하고 가공선로와의 병행구간을 축소하는 등의 대책 수립으로 유도장해가 경감된다.

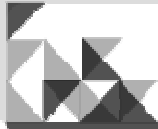
## (7) 중성점 다중 접지 방식의 이점

- ① 1선지락 사고시 전전상의 대지전압이 거의 상승하지 않아 기기 절연비용을 저감시킬 수 있다.
- ② 아크지락에 의한 이상전압, 차단시 개폐 동요값이 낮아 기기 절연 수준(BIL) 저감 가능
- ③ 피뢰기의 동작책무 경감 가능
- ④ 변압기 권선의 단절연 가능으로 변압기의 중략 및 가격 저하
- ⑤ 1선지락 고장시 고장전류가 커 확실한 보호기기의 동작 기대(짧은 동작시간, 확실한 동작)

## (8) 중성점 다중 접지 방식의 단점

- ① 1선지락 고장전류가 저역울 대전류이기 때문에 계통 안정도가 악영향을 줌.
- ② 통신선의 유도장해 유발 가능성이 높음
- ③ 지락전류의 과다로 전력기기의 기계적 충격이 큼
- ④ 지락전류가 작을 경우 보호기기의 부동작할 가능성이 있음
- ⑤ 중성선이 있어 부하 불평형이 발생할 가능성이 높음.





## 제 3교시 문제풀이

3-1. 수차의 전기식 조속기와 기계식 조속기를 비교하고, 조속기의 속도조정률과 속도변동률에 대하여 설명하시오.

답)

### 1. 전기적 조속기와 기계적 조속기의 비교

#### 1) 전기식 조속기의 장, 단점

##### (1) 장점

- ① 고감도이며 속응성이 좋다
- ② 부하추종성과 제어성이 좋다.
- ③ AFC 시스템 신호와 연동이 용이하다.
- ④ 고장, 오차가 적고 기계식 보다 소형이다.
- ⑤ 터빈 발전기의 보호시스템과 연동이 용이하다.
- ⑥ 고장 시 현장수리가 가능하다.
- ⑦ 부하차단 시 부동시간을 짧게 할 수 있다.
- ⑧ 원활한 주파수 검출이 가능하다.

##### (2) 단점

- ① 노이즈, 외란 등에 의해 오동작 할 수 있다.
- ② 고 신뢰도의 전원공급이 필수적이다.

#### 2) 기계식 조속기의 장, 단점

##### (1) 장점

- ① 동작이 확실하다.
- ② 전기적 노이즈 영향을 받을 우려가 없다.

##### (2) 단점

- ① 기계적 마모에 의해 오차가 발생할 수 있다.
- ② 부품의 가공 정밀도에 따라 성능이 좌우된다.
- ③ 전기식보다 감도, 속응성, 부하추종성이 뒤진다.

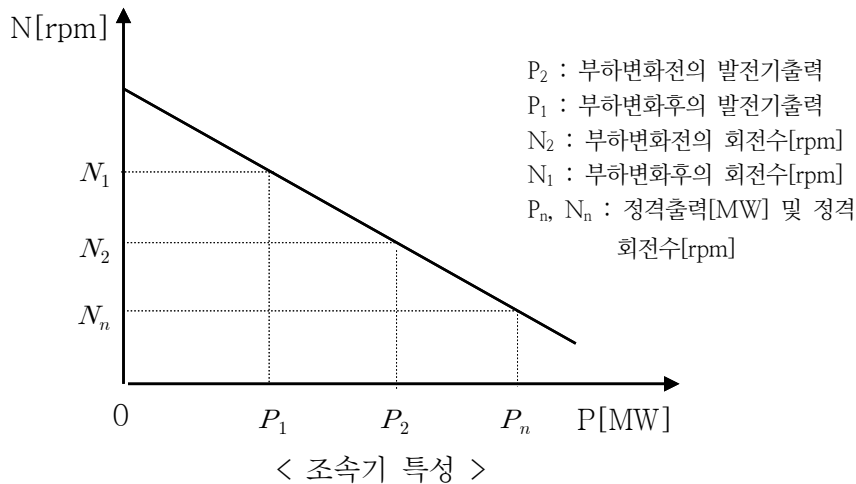
## 2. 조속기의 속도조정률과 속도변동률에 대하여 설명

### 1) 속도 조정률

#### (1) 정의

임의의 출력으로 운전 중인 수차의 조속기에 아무런 조정을 가하지 않고 직결된 발전기의 출력을 변화시켰을 때 정상상태에서의 회전속도의 변화분과 발전기의 출력의 변화분과의 비를 속도 조정률이라 한다.

#### (2) 개념도



#### (3) 관계식

$$\delta = \frac{\frac{N_1 - N_2}{N_n}}{\frac{P_2 - P_1}{P_n}} \times 100[\%] = \frac{\frac{f_1 - f_2}{f_n}}{\frac{P_2 - P_1}{P_n}} \times 100[\%]$$

위 식에서 부하변화 전에 발전기출력과 회전수를  $P_2 = P_n, N_2 = N_n$ 이라 하고, 변화 후의 발전기출력과 회전수를  $P_1 = 0, N_1 = N_0$ 라 하면

$$\delta = \frac{N_0 - N_n}{N_n} \times 100[\%] = \frac{f_0 - f_n}{f_n} \times 100[\%] \text{이 된다.}$$

- (4) 속도 조정률은 조속기의 특성을 나타내는 것으로 이 값이 작다는 것은 동일한 부하 변화에 대해 주파수 변화가 작다는 것으로 조속기의 동작이 민감하다는 뜻이다.
- (5) 속도 조정률은 전기식 조속기 사용 시 수력발전기에서는 3 ~ 5[%], 화력 발전기에서는 4 ~ 5[%] 정도이다.
- (6) 일정한 부하를 분담하는 발전소의 수차는 속도조정률을 크게 주파수 조정용 발전소에서는 작게 해야 한다.
- (7) 속도조정률이 적게 설정된 발전기는 부하분담이 크고, 속도조정률이 크게 설정된 발전기는 부하분담이 작다.

## 2) 속도변동률

### (1) 정의

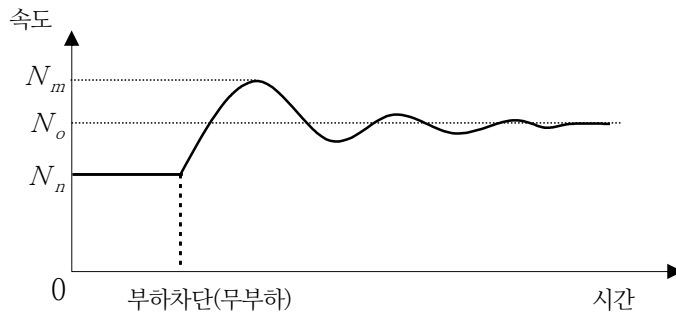
부하의 변동으로 수차의 속도가 조정되어 새로운 상태로 안착할 때까지의 속도변화의 폭과 시간과의 관계를 비로써 나타낸 것.

### (2) 관계식

$$\delta_m = \frac{N_m - N_n}{N_n} \times 100 [\%]$$

단)  $N_m$  : 최대회전속도[rpm],  $N_n$  : 정격회전속도[rpm]

### (3) 개념도



〈 부하 차단시의 속도특성 〉

- (4) 속도 변동률이 커진다는 것은 수차 발전기의 원심력에 대한 기계적인 내력, 발전기 전압 상승에 대한 절연내력이 좋지 않다는 뜻이므로 전 부하를 차단하였을 경우에도 이 값은 30%이하가 되게 설계한다.
- (5) 조압수조가 작을수록, 수격작용이 작을수록, 수압상승이 작을수록, 밸브를 천천히 닫을수록 속도변동률은 커진다.

**3-2. 345[kV] 및 154[kV] 변압기 중성점 피뢰기의 정격전압을 선정하고, 발전기 무부하 운전 중 주변압기(22/345[kV], △ - Y결선, 중성점 비접지)의 2차(고압)측에서 1선지락 발생 시 중성점에 설치된 피뢰기의 건전성을 판정하시오.**

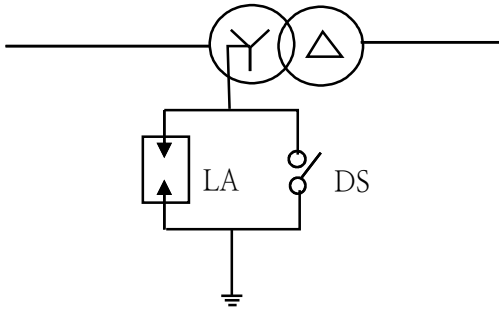
답)

## 1. 변압기 중성점 피뢰기 및 절연강도

### 1) 중성점 피뢰기 설치

유효접지의 조건이 만족되는 범위 내에서 일부 변압기의 중성점을 비접지(Floating)로 운전할 경우를 고려하여 중성점 Busing 및 피뢰기를 설치한다. 변압기 중성점에는 평상시 거의 전압이 가해지지 않으므로 경제적인 이유에서 단절연을 실시한다.

### 2) 설치도



## 2. 154kV 및 345kV 변압기의 중성점 피뢰기의 정격전압의 선정

- 1) 중성점 피뢰기의 정격전압의 선정은 1선 지락시의 중성점 전압상승을 고려하여 다음과 같이 선정한다.
- 2) 유효접지시 접지계수가 75%이므로 1선지락시 건전상의 최고 전위상승은 선간전압의 75% 이하이다.
- 3) 상승전압 =  $0.75 \times \text{설계최고 전압}$  (154kV의 경우  $0.75 \times 170$ ) 127kV로 이를 상전압에 대한 값으로 표시하면  $\frac{127}{\frac{170}{\sqrt{3}}} = 1.3$ 배의 상전압이 된다. a상 지락시 b, c 상은 최대 1.3 배가 되므로 0점의 중성점 전위가 0'점으로 이동 된 값은 0.468 E 가 된다.

4) 154kV 계통의 중성점 최대 전위 상승  $E_n = 0.468 \times 170 / \sqrt{3} = 45.9\text{kV}$

5) 345kV 계통의 중성점 최대 전위 상승  $E_n = 0.468 \times 362 / \sqrt{3} = 97.8\text{kV}$

이에 따른 피뢰기 정격은 154kV의 경우 72kV, 345kV의 경우 144kV로 선정한다.

6) 선정된 피뢰기의 특성을 기준으로 변압기 중성점의 BIL은

154kV의 경우  $270 \times 1.2 = 324\text{kV} - 350\text{BIL}$ ,

345kV의 경우  $363 \times 1.2 = 436\text{kV} - 450\text{BIL}$

7) 중성점 보호용 피뢰기 정격

공칭전압 (kV)	정격전압 [kV]	공칭방전전류 [kA]
345	144	10
154	72	10

## 2. 중성점에 설치된 피뢰기의 건전성을 판정

### 3-3. 초전도 자기에너지 저장장치(SMES)의 기본구성, 동작원리, 특징 및 적용에 대하여 설명 하시오.

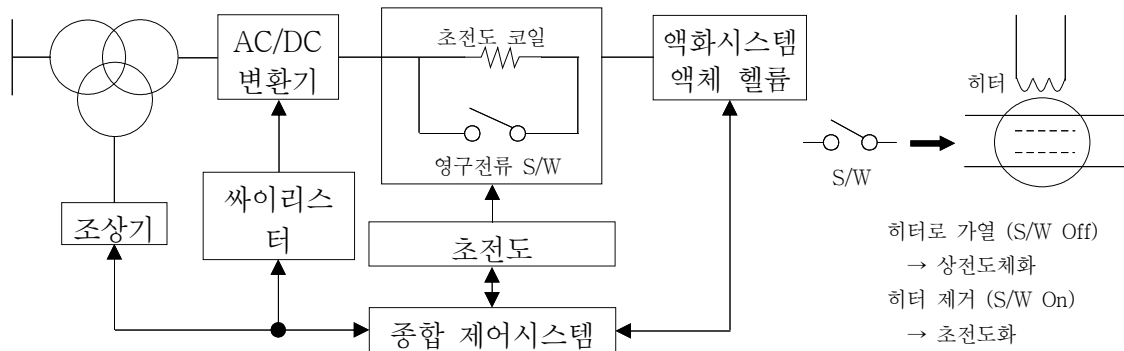
답)

#### 1. 초전도 자기에너지 저장장치(SMES)의 기본구성, 동작원리, 특징 및 적용에 대하여 설명

##### 1) 정의

초전도 코일에 전류를 흘리면 손실없이 자기에너지  $WL = 1/2 LI^2$  형태로 에너지를 저장하는 장치를 말한다.

##### 2) 기본구성



< SMES 구성도 >

##### 3) 동작 원리

- (1) SW On시 순환전류에 의해 초전도체에  $\frac{1}{2}LI^2$  형태로 에너지가 저장됨.
- (2) AC/DC 변환기로 전류 공급
- (3) S/W Off시 에너지를 저장
- (4) AC/DC 변환기로 계통에 공급

##### 4) 특징

- (1) 에너지 저장효율 (95%이상) 높고, 제어응답속도(수ms)가 매우 빠르다.
- (2) 유, 무효 전력을 독립적으로 제어 가능하다.
- (3) 에너지 저장 밀도가 높다.
- (4) 수명이 반영구적이며 환경 친화적이다.

##### 5) 적용

- (1) 양수발전 대체나 변전소 등에 분산 배치하는 부하평준화 용도
- (2) 부하평준화, 부하변동 보상, 안정도 향상, 전력품질 향상등 효과 기대
- (3) 대규모는 1 GW급, 중규모는 10 MW급, 소규모는 100 kW급 사용

### 3-4. 전선로나 변전소에 사용되는 애자의 염진해 대책에 대하여 설명하시오.

답)

#### 1. 개요

옥외용 전력설비는 다양한 기후·환경요인 및 오손요인에 노출되는 것이 불가피하며, 전력설비의 절연부는 오손 및 습윤으로 인해 전기적 특성이 크게 저하된다. 이러한 특성으로 인해 옥외 전력설비의 설계에 있어서 염진해 현상은 해당선로의 전압, 용량 등과 더불어 가장 중요한 요인 중 하나로 여겨지고 있다.

#### 2. 염진해 고장의 발생

염진해 고장은 애자류가 해수염분 또는 진애를 포함한 바람을 맞아 오손되어 외기의 상태에 따라 그 표면이 습윤했을 때에 절연이 저하해서 발생하는 것이다. 염진해 고장의 발생은 매우 복잡한 확률현상으로서 모든 조건에 대하여 고장을 완전무결하게 없도록 한다는 것은 기술적, 경제적으로 곤란한 문제가 많다.

#### 3. 애자의 염진해 대책

##### 1) 절연강화

- (1) 정인무중법에 의한 애자 개당의 설계내전압곡선을 이용하여 상용주파단시간과전압에 견디도록 설계한다.
- (2) 애자중결, 내염용 애자 또는 상위절연계급의 애자사용으로 애자표면의 누설거리를 증가시켜 절연강화를 한다.
- (3) 오손지역별로 소요되는 애자수량

오손구분	청정지역	A	B	C	D
상정등가 염분 부착밀도(mg/cm <sup>2</sup> )	0.03이하	0.03초과 0.063이하	0.063초과 0.125이하	0.125초과 0.25이하	0.25초과 0.5이하
154kV	10	11	12	14	16
345kV	19	22	25	30	33

##### 2) 세정

- (1) 애자에 부착된 염분 또는 진애를 주수에 의하여 제거한다.
- (2) 세정장치는 높은 세정 내전압, 우수한 세정효과, 강한 내풍성능이 요구된다.
- (3) 세정장치는 고정세정장치(주로 스프레이 또는 수막), 간이고정세정장치(제트), 이동세정장치(제트), 휴대식 세정장치(브러쉬식)로 분류된다.

- (4) 애자세정은 일반적으로 활선에서 하는 것으로 한다. 전압별 오손내전압 설계치(목표치)는 다음과 같다.

$$\textcircled{1} 154kV : 170kV \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 99kV$$

$$\textcircled{2} 345kV : 362kV \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 209kV$$

$$\textcircled{3} 765kV : 800kV \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.2 = 555kV$$

### 3) 염해방지제 도포

- (1) 분무식 실리콘 코팅제 등을 애자의 표면에 도포하여, 염분 등 이물질 부착시 이슬, 빗물에 의한 자연세척 효과가 있어 이물질 흡착이 거의 안됨과 동시에 발수성에 의해서 습윤을 방지하여, 애자의 절연저하를 방지하는 방법을 말한다. 유효수명을 고려하여 주기적으로 도포하며 다음의 경우에 적용한다.

- ① 피뢰기가 염분오손에 의하여 특성에 악영향을 받을 우려가 있는 경우
- ② 정지가 비교적 용이하고, 극단적인 진에 오손을 받지 않는 장소에 설치된 기기로서 다른 대책과 비교하여 경제적으로 유리한 경우
- ③ 잠정 대책
- ④ 임시 설비



3-5. 국내에 적용 중인 'FACTS(Flexible AC Transmission System)' 설비의 대하여 보상대상, 제어목적, 동작원리 및 특징을 각각 설명하시오.

답)

## 1. 국내 적용 중인 **FACTS(Flexible AC Transmission System)** 설비

### 1) 신제천변전소

SVC -225 ~ +675[MVar], STATCOM  $\pm 400$ [MVar], TCSC

### 2) 신영주 변전소

STATCOM

### 3) 신부평변전소

SVC  $\pm 400$  [MVar], STATCOM  $\pm 400$ [MVar],

### 4) 동해변전소

SVC -225 ~ +675[MVar], STATCOM  $\pm 400$ [MVar]

### 5) 강진 변전소 장흥 T/L

UPFC 80[MVA]

## 2. **STATCOM (Static Synchronous Compensator)**

### 1) 정의

IGBT, IGCT등 자력식 전력소자의 대용량화에 의한 전압원 인버터를 이용하여 무효전력을 공급할 수 있는 새로운 방식의 무효전력 제어설비로 SVC의 성능을 혁신적으로 개선하여 무효전력의 연속제어가 가능하도록 한 설비를 말한다.

### 2) 보상대상

무효전력 및 전압을 병렬 보상한다.

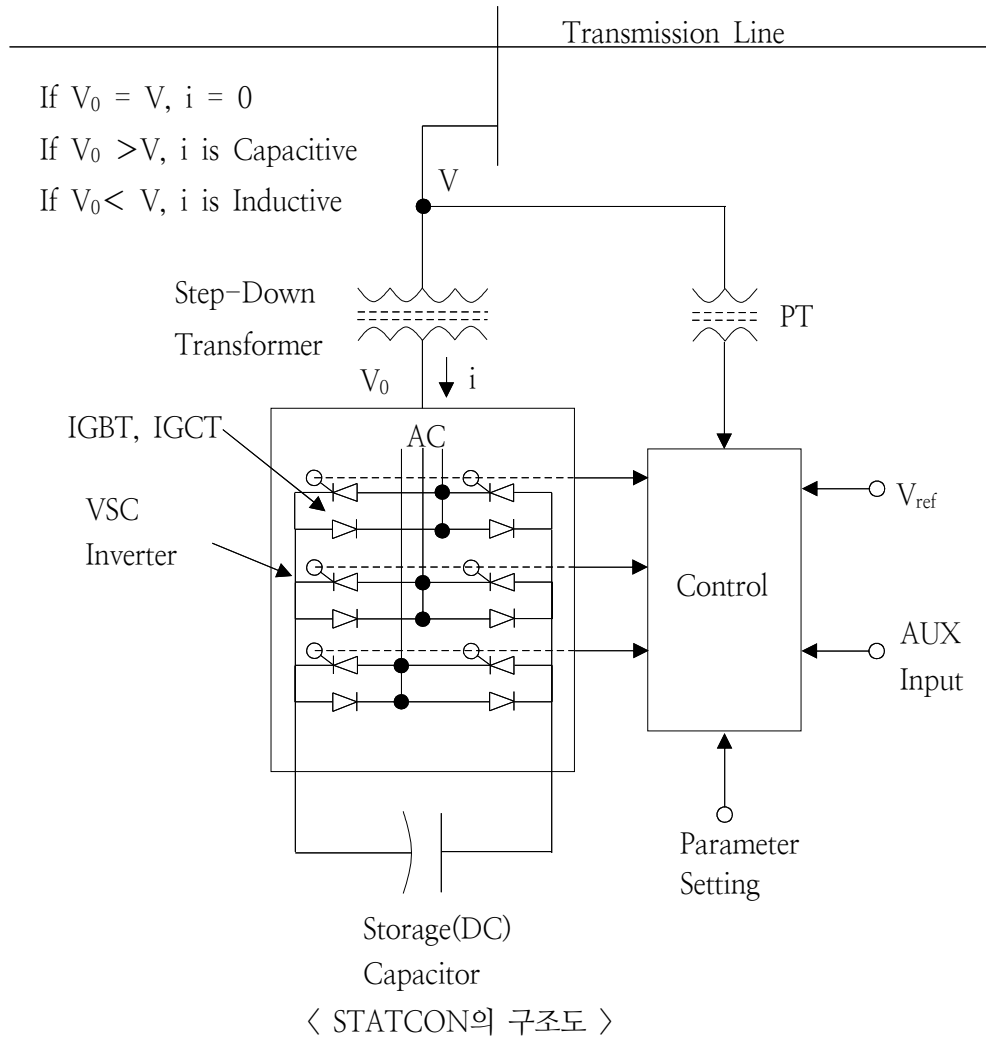
### 3) 제어목적

- (1) 전압 조정으로 전력조류 제어 및 송전용량 증대
- (2) 계통동요 억제 및 전압 제어로 안정도 증진
- (3) 배전계통에서 전력 품질 향상 및 전력공급능력 향상 (신속한 전압유지기능)  
플리커 억제, 전압강하보상, 전압변동 억제, 과도전압억제

### 4) 동작원리

- (1) 모선 측 전압과 기준 전압값을 비교하여 모선전압이 낮으면 용량성 전류를 흘려 무효전력 공급원으로 동작한다.
- (2) 모선 측 전압과 기준 전압값을 비교하여 모선전압이 높으면 유도성 전류를 흘려 무효전력 소비원으로 동작한다.

## 5) 구성도



## 6) 특징 (STATCOM이 SVC나 동기조상기에 비해 갖는 장점)

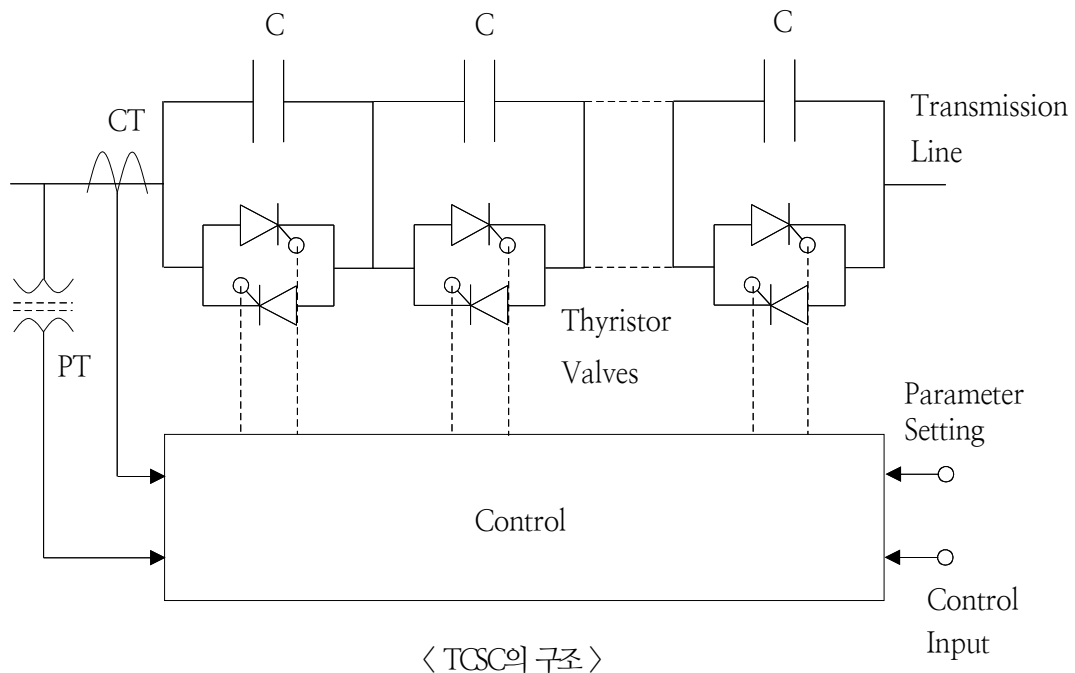
- (1) IGBT, IGCT의 자려식 전력소자의 대용량화에 의한 전압원 인버터를 사용한다.
- (2) 기계 동작부가 없어 신뢰도가 높고 진동, 소음이 작다.
- (3) 진상, 지상 무효전력을 연속적으로 제어가 가능하다.
- (4) Storage Capacitor를 이용하여 에너지 저장능력이 있으므로 유효전력 제어도 일부 가능하다.
- (5) 대용량 콘덴서나 인덕터를 사용하지 않기 때문에 설치면적이 SVC의 70% 정도로 작다.

## 3. TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

## 1) 정의

직렬콘덴서를 선로에 직렬로 삽입하고 전력용 반도체 소자를 이용하여 제어해서 선로임피던스를 연속으로 제어하는 장치

## 2) 구조도



## 3) 보상대상

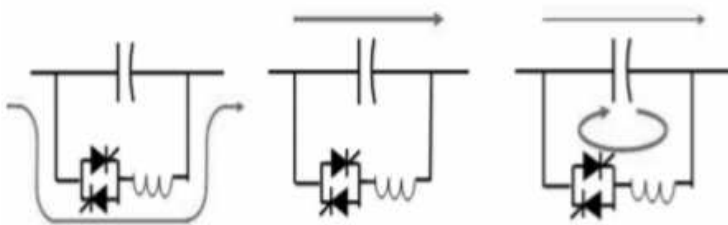
선로임피던스를 직렬 보상한다.

## 4) 제어목적

- (1) 선로임피던스 제어로 송전용량을 증대시킨다.
- (2) 선로임피던스 제어로 전력조류 제어 및 안정도를 증진시킨다.

## 5) 동작원리

- (1) TCSC의 기본적인 제어는 아래 그림과 같이 싸이리스터의 TCR 완전도통, TCR 완전차단, 연속점호각 제어모드 등으로 나누어진다.
- (2) TCR 완전 도통의 경우 직렬 커패시터와 인덕터의 합성 임피던스가 계통에 연계되는 것과 같으며, TCR 완전 차단인 경우 직렬 커패시터만 계통에 연계됨과 같다.
- (3) 연속 점호각제어 모드의 경우 점호각을 연속적으로 제어함에 따라 커패시터와 인덕터의 합성 임피던스가 가변되는 제어 모드가 된다.



【그림 14】 TCSC의 제어모드

## 6) 특징

- (1) 다른 설비에 비해 투자비가 작다.
- (2) 기존선로에 설치가 용이하다.

- (3) 공사기간이 짧다.
- (4) 선로 고장시 고장전류가 직렬 C에 흐르므로 고장전류 억제용 보호장치가 필요하다.
- (5) 직렬콘데서 보상시 이상전압이 발생한다.

#### 4. SVC (정지형 무효전력보상장치, *Static Var Compensator*)

##### 1) 정의

SVC는 기존의 기계식 차단기에 의해 개폐제어 되던 무효전력 보상장치인 인덕터와 커패시터 뱅크들을 Thyristor 를 이용하여 개폐 제어하는 무효전력 보상설비이다.

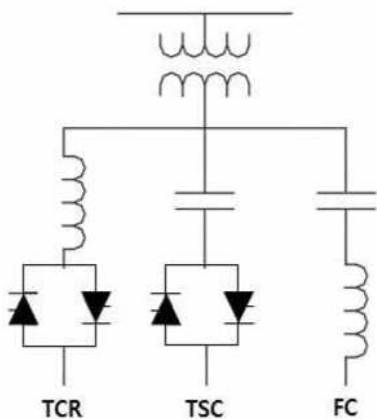
##### 2) 보상대상

무효전력 및 전압을 병렬 보상한다.

##### 3) 제어목적

- (1) 전압 조정으로 전력조류 제어 및 송전용량 증대
- (2) 계통동요 억제 및 전압 제어로 안정도 증진
- (3) 배전계통에서 전력 품질 향상 및 전력공급능력 향상 (신속한 전압유지기능)  
플리커 억제, 전압강하보상, 전압변동 억제, 과도전압억제

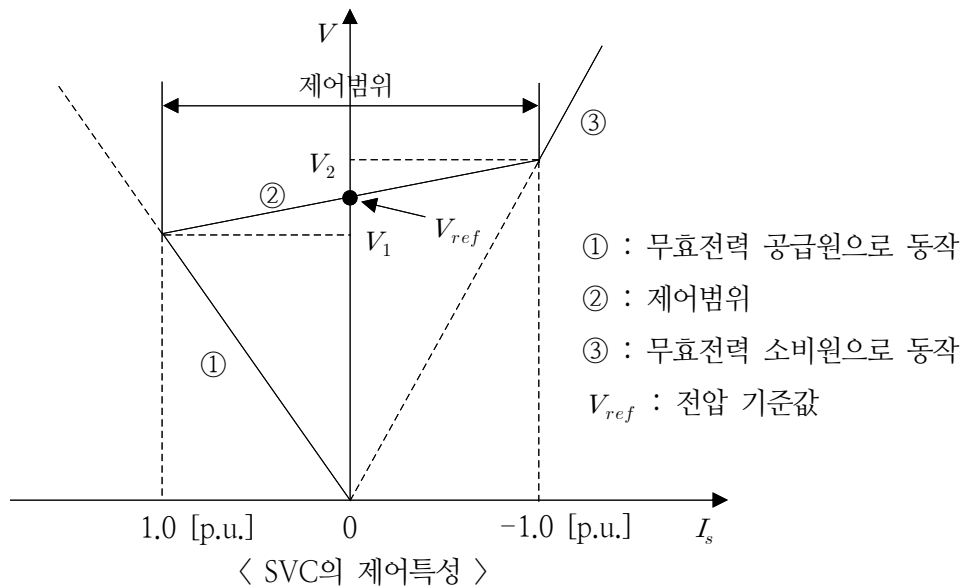
##### 4) 구성도



【그림 7】 SVC의 구성도

##### 5) 제어원리

- (1) 계통전압과 기준전압이 같을때는 조상기로서 역할을 하지 않는다.
- (2) 무효전력을 연속적으로 제어한다.
- (3) 계통전압이 기준전압보다 낮을 때는 무효전력공급원으로 동작하여 무효전력을 공급하여 전압을 높인다.
- (4) 계통전압이 기준전압보다 높을 때는 무효전력소비원으로 동작하여 전압을 낮춘다.
- (5) TSC가 계단적으로 투입되면 TCR이 연속적으로 동작하여 연속제어가 가능하게 하며  $V_1$ ,  $V_2$ 가 제어범위가 된다.
- (6) 제어범위를 벗어나면 성능이 급격히 저하한다.

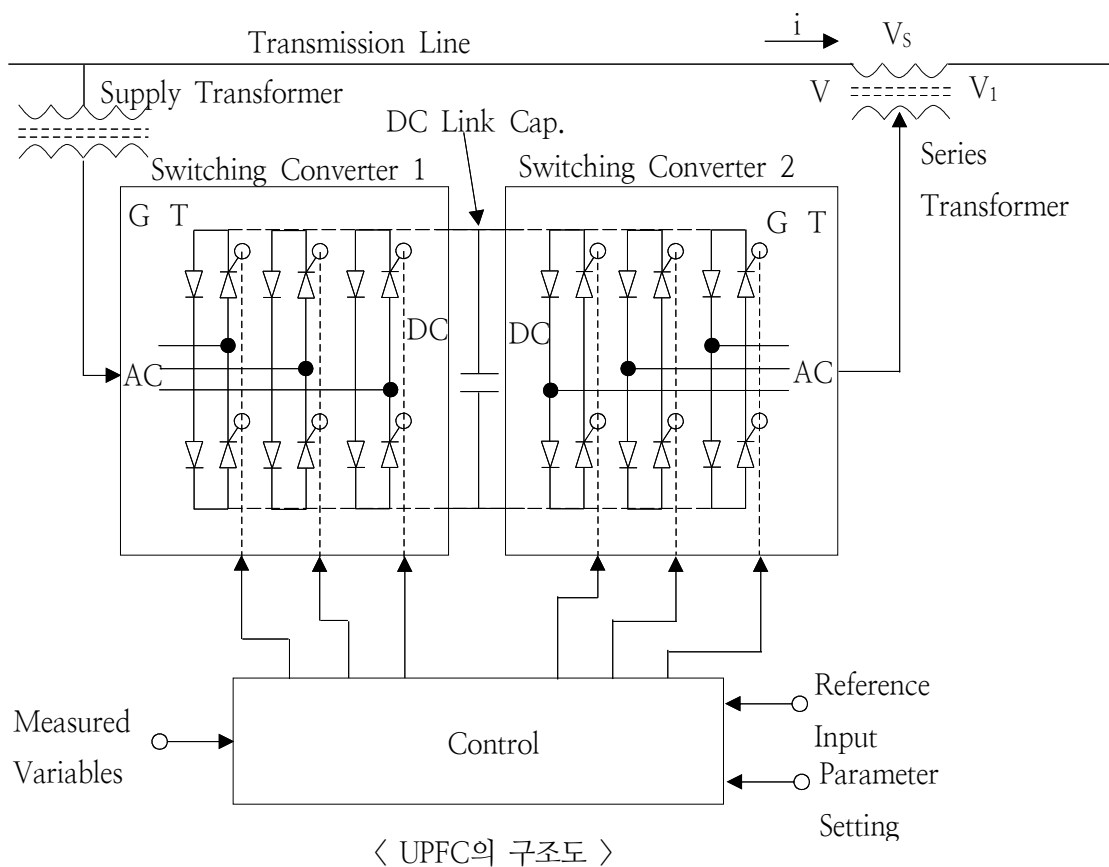


## 5. UPFC (Unified Power Flow Controller)

### 1) 정의

전압원 인버터는 보상전압 투입에 따라 변동되는 무효전력을 공급 또는 흡수할 수 있고 DC 콘덴서를 통하여 유효전력까지 공급, 소비할 수 있다. 이 장치는  $\theta$ ,  $V$ ,  $X$ 를 종합적으로 제어할 수 있으며 2가지 조정을 동시에 할 수 있는 장치를 말한다.

### 2) 구성도



**3) 보상 대상**

전압, 위상각, 리액턴스를 직, 병렬 보상한다.

**4) 제어목적**

- (1) 선로임피던스, 전압, 위상각 제어로 전력조류 제어 및 안정도 증진
- (2) 유, 무효전력 제어가 신속하고 계통동요 억제가 우수하다.

**5) 동작원리**

- (1) UPFC는 구조적으로는 STATCOM과 같은 병렬 인버터와 SSSC와 같은 직렬 인버터가 DC 커패시터로 결합된 구조이다.
- (2) 병렬 인버터는 STATCOM과 같이 모선 전압을 제어하는 한편 직렬 인버터에 의해 소요되는 유효 전력을 공급하는 역할도 수행한다.
- (3) 직렬 인버터에 유효 전력을 공급하면 직렬 인버터의 출력전압, 즉 직렬 주입전압의 크기 뿐만 아니라 위상까지 가변할 수 있다.
- (4) 직렬 인버터는 UPFC의 핵심적인 역할을 수행하는데 송전선로에 직렬변압기를 통하여 전압을 주입한다.
- (5) 이때 주입 전압의 크기와 위상각을 동시에 변화 시켜 송전선로의 유효전력 및 무효전력 조류를 제어한다.
- (6) SSSC의 경우 주입전압의 크기 제어만 가능한데 반해 UPFC의 직렬 인버터의 경우 주입전압의 위상제어가 가능한 차이가 있다.

**6) 특징**

- (1)  $P = \frac{E_s E_r}{X} \sin\theta$ 에서 송전에 영향을 미치는 전압, 위상각, 임피던스를 종합적으로 제어가 가능하다.
- (2) 동시에 2가지 제어가 가능하다.

### 3-6. 사선상태에서 고전압 회전기기(발전기, 전동기)의 고정자 권선 절연진단 방법에 설명하시오.

답)

#### 1. 개요

대용량 발전기 및 고압전동기 (회전기) 고정자 권선은 장기간 운전하는 동안에 열적, 전기적, 기계적 및 환경적 영향으로 인해 절연재료 내부의 보이드 (Void) 생성, 반도체층 손상과 단말권선 (Endwinding) 표면 오손으로 상간방전 (Phase to phase) 등에 의한 열화 및 냉각수 흡습과 누수가 서서히 진행하다가 최종적으로 절연파괴에 도달한다.

#### 2. 사선상태에서 고전압 회전기기의 고정자 권선 절연진단 방법

##### 1) 절연물에 대한 저항

메거를 이용하여 절연저항을 측정하여 열화 정도를 판정하는 방법

##### 2) 누설전류 측정

접지선에 흐르는 누설전류를 검출하여 측정하는 방법

##### 3) 유전정접 측정

유전 정접 시험에는 절연물에 교류 전압을 인가한 후  $\tan\delta$ -전압 특성으로 부터 흡습 · 오손 · 열화 · void 등 절연 성상에 관한 정보를 얻는 시험이다.

##### 4) 부분방전 시험

절연에 고전압을 인가하면 void나 공극의 존재에 의한 부분 방전이 발생한다. 그 부분방전의 방전 전하량 및 발생 빈도를 측정하여 절연 열화에 의한 void나 공극의 증가 및 절연 열화 인자로서의 부분 방전 정보를 얻는 시험이다.

##### 5) 직류 고전압 시험

절연물에 직류전압을 인가한 후 전류-시간 특성, 전류의 파형, 누설 전류 특성, 전압 특성으로부터 절연 상태를 파악한다.

##### 6) 교류 고전압 시험

교류 전류시험에는 절연물에 교류 전압을 인가해서 전류 · 전압 특성을 측정함으로써, 주로 void 및 흡습, 이물 부착에 관한 정보를 얻는 시험이다.

##### 7) VLF 시험

## 8) 표준시험 표

〈표 1〉 IEEE std 56-1977(1991) "Guide for Insulation Maintenance of Large AC Rotating Machinery (10,000 kVA and Larger) [ANSI]"

시 험 항 목		측정 Parameter	평 가
고정자	절연저항	직류고전압에 의한 1분 절연 저항값	IEEE Std 43-1974 주위 온도·습도, 개별기기 및 절연체에 따른 측정치 편차가 매우 심하다. 측정치에 의한 판정이 어렵고 변화경향 관리
	성극비	직류고전압에 의한 1분 절연항과 10분 절연 저항의 비	IEEE Std 43-1974, 직류고전압을 사용하기 때문에 기본적으로 주위 온·습도에 따른 편차는 발생
	내전압	1분 내전압	상간전압의 125~150%인 교류 또는 직류 과전압, 각 상별로 No Breakdown
	Turn간 절연	Turn-to-Turn 내전압	슬롯에 설치된 유도코일에 방전전류를 흘려 Turn간 전압 발생시켜 내전압시험
	부분방전	최대부분방전량	정격 대지간 교류전압 인가시 부분방전 측정기로 방전 관측
		Corona Probe	고정자를 여자시키고 Antenna 또는 Corona Probe로 권선 구조부를 탐색
	도체저항	도체권선의 직류저항값	권선 도체의 Crack 발생 또는 접속부의 이완, 변형 등을 점검하고 각 상 비교
	RTD	측정 정확도	저항식 온도 측정 센서의 정확도 측정
		절연저항	RTD의 절연특성 점검
	관통Bolt	절연저항	고정자를 관통하는 절연 고정나사 점검
	코아절연	절연저항	고정자를 구성하는 코아의 각 규소강판 사이의 절연특성(Inter-laminar 절연)
유전정점	손실량 상승분		절연체의 열화관련 측정인자
	정전용량 상승분		교류전류측정에서의 전류증가분과 유사

## 3. 절연진단 결과 분석

절연진단 시험에서는 교류전류, 유전정점, 부분방전 크기 및 패턴 등을 측정하여 종합적인 평가와 분석을 통해 회전기의 절연상태를 양호, 요주의, 분해점검, 절연보강 및 권선교체 등으로 분류하여 판정한다.

## 1) 양호

고압전동기 절연진단 데이터를 분석한 결과 교류전류, 유전정점 및 부분방전 등이 모두 기준값 이하로 나타나면 고정자 권선의 절연상태를 양호하게 판정한다.

## 2) 요주의 (매년 진단)

고압전동기 절연진단 데이터를 분석한 결과 교류전류, 유전정점 및 부분방전 중에 두 항목이 양호하고 한 항목이 불량하면 요주의로 판정하고 매년 진단을 수행한다. 이런 경우 주기적으로 매년 절연진단을 실시하여 트렌드 (Trend)에 의한 데이터 관리를 통해 절연열화 정도를 분석함으로써 재권선 시점을 적절하게 판단할 수 있다.



**3) 분해점검 (세척 후 건조)**

고압전동기 고정자 권선에서 이물질이 세척하고 건조 후에 재진단을 시행하는 경우에 거의 대부분이 양호하게 판정되었다. 따라서 고압전동기 분해점검으로 판정된 경우 세척 후 건조하고 진단하면 모두 양호하다.

**4) 절연보강 (재함침)**

- (1) 고정자 권선 표면의 코일과 슬롯의 상대적인 움직임으로 인해 마모되어 반도체층을 손상시키면 슬롯 방전이 발생한다.
- (2) 반도체층이 손상됨에 따라 일부 권선의 접지상태는 나빠지고 권선 표면에 전하가 축적되어 철심과 권선 사이에 방전을 일으킨다.
- (3) 이와 같이 슬롯방전의 크기가 크게 나타날 때 절연보강을 판정한다.
- (4) 절연보강시 재함침시에 바니쉬가 슬롯과 고정자 권선 사이에 양호하게 유입되기 때문에 부분방전의 크기가 감소한다.

**5) 권선교체**

고압전동기 고정자 권선 교체는 교류전류, 유전정접 및 부분방전 크기를 종합적으로 평가하고 있으며, 절연열화로 인해 주절연 내부에 공극이 발생하여 내부방전이 크게 나타나거나 도체표면에서 부분방전이 발생할 때 권선교체를 판정한다.

## 제 4교시 문제풀이

### 4-1. 연료전지 중 고체산화물 연료전지(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)의 특성과 장,단점을 설명하시오.

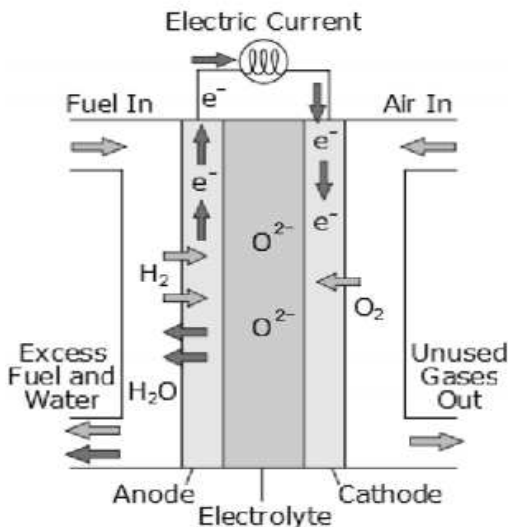
답)

#### 1. 고체산화물 연료전지의 정의

고체산화물 연료전지는 약 700~800℃ 이상에서 작동하며 세라믹 기반의 고체 전해질을 갖는 구조로 연료를 전기화학적으로 반응을 일으켜 발생한 전자를 이용해 전기에너지를 만드는 에너지 변환장치를 말한다.

#### 2. 작동 원리

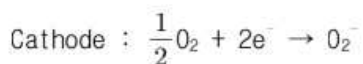
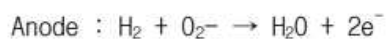
##### 1) 원리도



##### 2) 작동 원리

- (1) 양극(+)에서는 공기로부터 얻은  $O^0$ 가 환원되어 생성된  $O^{2-}$  이온은 산소이온 전도성 전해질을 통해서 음극(-)로 이동하는데 여기서 그들은 기체연료(Gaseous Fuel)와 반응하여 열(Heat)과 물( $H_2O$ )을 생성하고, 탄화수소 연료의 경우에는 이산화탄소( $CO_2$ ) 또는 일산화탄소( $CO$ )를 만든다. 그리고 전자  $e^-$ 가 외부회로(External Circuit)를 통해 양극(+)극으로 이동하여 전류를 흐르게 한다.

##### (2) 반응식



### 3. 고체산화물 연료전지의 특성

#### 1) 경제적 특성

- (1) 고가의 백금촉매를 사용 안함.
- (2) 연료의 다양화로 개질기가 필요 없음.
- (3) 전해질 보충이 필요 없음.
- (4) 실제 사용시 발생하는 물 및 열 등에 의한 변형이 없어 air conditioner가 필요 없음.
- (5) 가정용의 가격경쟁력이 매우 유리.

#### 2) 기술적 특성

- (1) 다양한 연료를 사용으로 발전시스템이 간단. (천연가스, 석탄가스 등)
- (2) 개질기가 필요 없음 (수소사용시만)
- (3) 구성요소가 모두 고체산화물로 형태로 사용 된다.
- (4) 기하학적인 모양에 따라 원통형, 평판형, 일체형 등으로 구분된다.
- (5) 고온(약 600~1000℃)에서 작동되기 때문에 구성요소의 대부분이 세라믹 및 내열성 금속으로 구성된다.

### 4. 고체산화물 연료전지의 장, 단점

#### 1) 장점

- (1) 전기 출력이 크다.
- (2) Pt(백금)와 같은 고가의 촉매가 불필요
- (3) 높은 폐열을 활용하여 종합 에너지 효율이 높음. 배기가스가 고온이므로 배기가스를 이용한 열병합발전 등이 가능하다.
- (4) 다양한 연료의 사용이 가능.
- (5) 구성 요소가 모두 고체이므로 다루기가 간편하고 또한 출력 밀도가 높음
- (6) 두 극 사이의 압력차에 강함
- (7) 분해성 혹은 부식성 액체를 사용하지 않으므로 보수가 비교적 용이하다.
- (8) 고체 고분자 연료전기와는 달리 연료 기체의 교차가 없다.
- (9) 오염물질( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ )을 거의 발생 하지 않는 청정발전방식이다.
- (10) 타 연료전지와 비교해 탄화수소나 알콜을 수소로 바꿔 연료전지로 공급하는 역할을 하는 개질기가 필요 없어 발전시스템이 간단하고, 경량화가 가능하다.
- (11) 이동형 전원장치부터 대형 발전소까지 적용의 폭이 매우 넓다.

#### 2) 단점

- (1) 작동온도가 낮아질 경우 충분한 출력을 얻을 수 없음.
- (2) 고온에서 작동하므로 주변재료의 선택에 한계가 있음.

**4-2. 345[kV] 및 154[kV] 모선과 송전선에 적용되는 계기용변압기의 설치, 결선방식 및 용도에 대하여 설명하시오.**

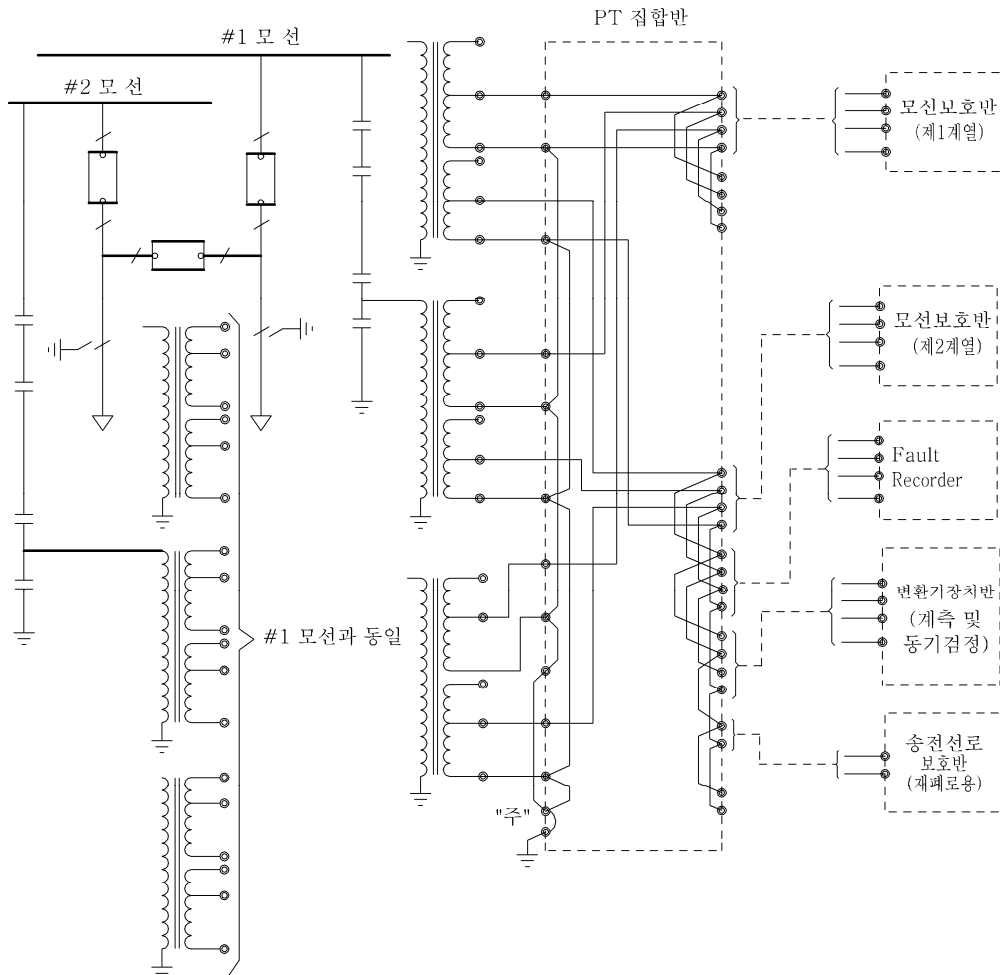
답)

**1. 개요**

모선 P.T는 원칙적으로 모선연락 또는 모선 구분차단기에 의하여 분리되는 모선에 각각 설치하여 보호 및 계측용, 동기검정용으로 사용하고 송전선로의 선로측 P.T는 보호 및 계측용으로 사용한다.

**2. 345[kV] 모선 계기용 변압기 회로의 설치, 결선방식 및 용도**

**1) 결선방식**



(주) 접지는 별도의 접지단자를 통해 시행하는 것을 원칙으로 한다.

## 2) 설치 및 용도

(1) 345kV 모선인 경우 1.5 CB 방식에서만 양모선(#1, 2)에 각각 모선 P.T를 설치한다.

(2) 모선 P.T는 단상 3대를 각상에 설치하며 2개의 2차권선을 가지도록 한다.

○ No. 1 2차권선  $\left(\frac{115}{\sqrt{3}} V\right)$

① 모선보호용 (제 1계열)

○ No. 2 2차권선  $\left(\frac{115}{\sqrt{3}} V\right)$

① 모선보호용 (제 2계열)

② 재폐로용(B상)

③ 동기검정(Voltage Selection)

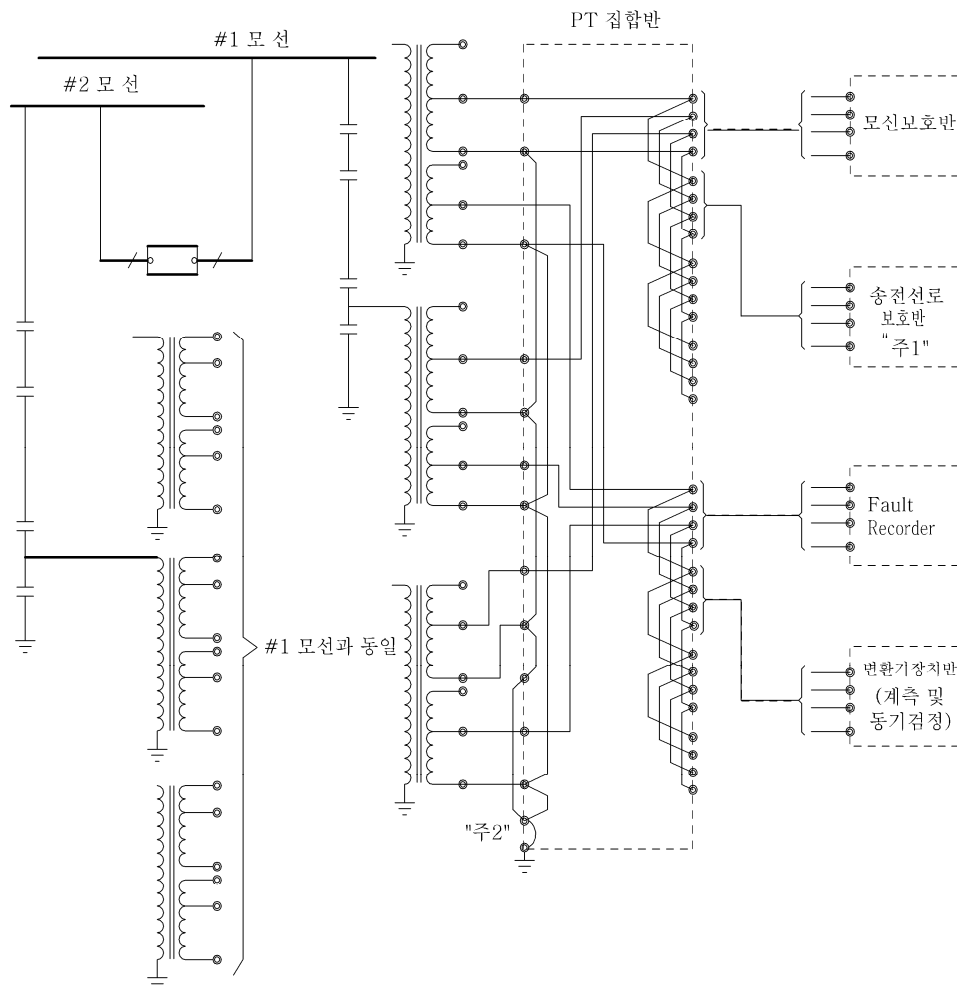
④ 계기용

(3) P.T는 1, 2차(2개권선) 공히 Y결선을 하고 2차 측의 중성점 접지장소는 특별한 사유가 없는 한 현장단자함에서 예비단자를 사용하여 한 장소만 시행함을 원칙으로 시행한다.

단, 765kV 및 345kV, 154kV 모선 P.T의 경우 접지장소를 P.T집합반에서 시행한다.

## 2. 154[kV] 모선 계기용 변압기 회로의 설치, 결선방식 및 용도

### 1) 결선방식



(주 1) 영상전압 필요시 보조 PT 취부 후 결선 사용

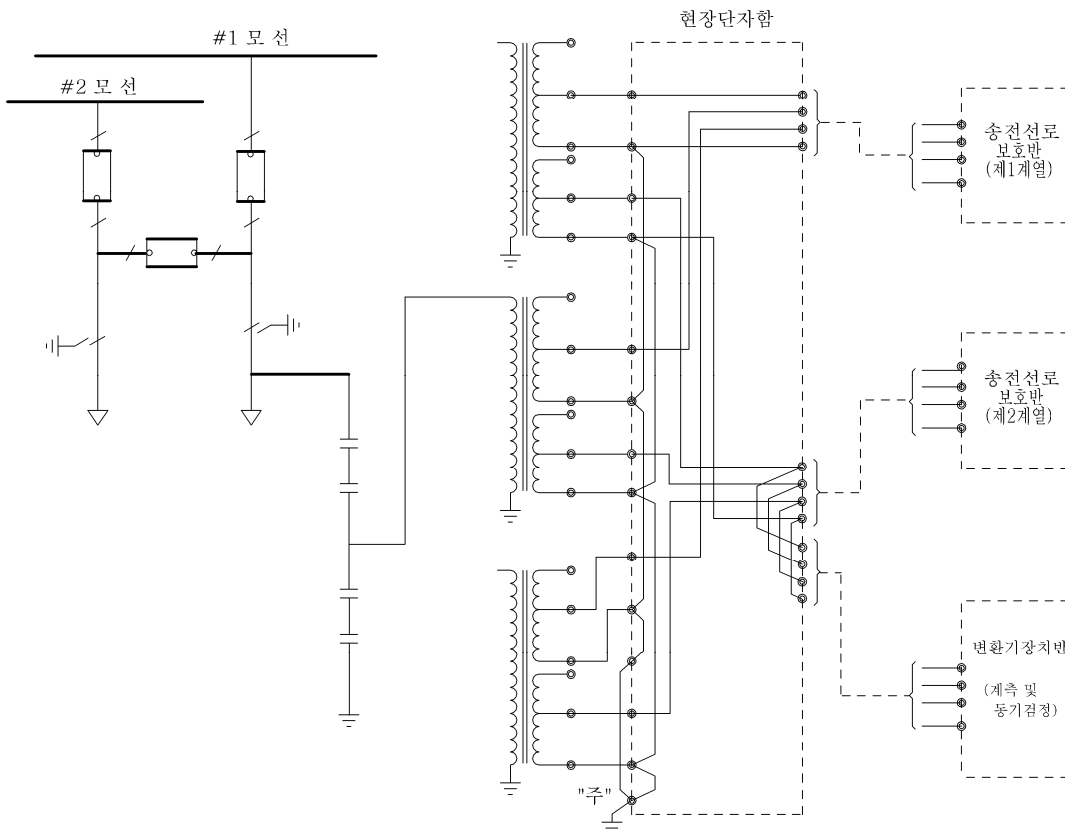
(주 2) 접지는 별도의 접지단자를 통해 시행하는 것을 원칙으로 한다.

## 2) 설치 및 용도

- (1) 양 모선(#1, #2)에 모선 P.T를 설치하며 주모선이 구분차단기에 의하여 분리될 경우는 각 구분마다 설치한다.
- (2) 모선 P.T는 단상 3대를 각 상에 설치하며 2개의 2차권선을 가지도록 한다.
  - No.1 2차권선  $\left(\frac{110}{\sqrt{3}} V\right)$  : 보호계전기용
  - No.2 2차권선  $\left(\frac{110}{\sqrt{3}} V\right)$  : 계기용
- (3) 방향성 지락과전류계전기에 사용되는 영상전압은 해당 보호배전반에 보조PT를 설치하여 구성한다.
- (4) P.T는 1, 2차(2개권선) 공히 Y결선을 하고 2차 측의 중성점 접지장소는 특별한 사유가 없는 한 현장단자함에서 예비단자를 사용하여 한 장소만 시행함을 원칙으로 시행한다.  
단, 765kV 및 345kV, 154kV 모선 P.T의 경우 접지장소를 P.T집합반에서 시행한다.

## 1. 345[kV] 송전선용 계기용 변압기 회로의 설치, 결선방식 및 용도

### 1) 결선방식



(주) 접지는 별도의 접지단자를 통해 시행하는 것을 원칙으로 한다.

### 2) 설치 및 용도

- (1) 345kV 송전선로 보호계전기 전용으로 각 송전선 인출에 설치한다.
- (2) P.T는 단상 3대를 각상에 설치하며 2개의 2차 권선을 가지도록 한다.

○ No.1 2차권선  $\left(\frac{115}{\sqrt{3}} V\right)$

① 선로보호용(제 1계열)

○ No.2 2차권선  $\left(\frac{115}{\sqrt{3}} V\right)$

① 선로보호용(제 2계열)

② 재폐로용

③ 동기검정(Voltage Selection)

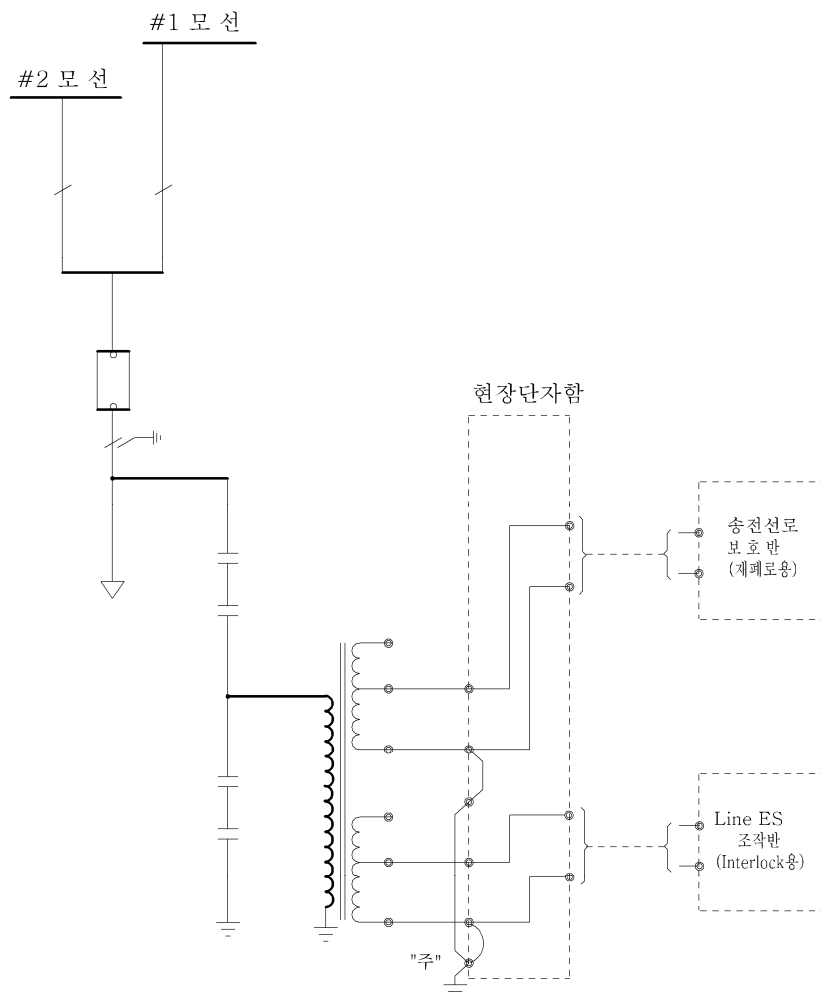
④ 계기용

(3) P.T는 1, 2차(2개권선) 공히 Y결선을 하고 2차 측의 중성점 접지장소는 특별한 사유가 없는 한 현장단자함에서 예비단자를 사용하여 한 장소만 시행함을 원칙으로 시행한다.

단, 765kV 및 345kV, 154kV 모선 P.T의 경우 접지장소를 P.T집합반에서 시행한다.

## 1. 154[kV] 송전선용 계기용 변압기 회로의 설치, 결선방식 및 용도

### 1) 결선방식



### 2) 설치 및 용도

(1) 154kV 송전선로 P.T는 한상(A상)에만 설치하며 2차 전압은 재폐로 계전기의 동기검정 용으로 사용한다.

### 4-3. 유입식변압기의 유중가스를 이용한 상태진단 및 고장진단 방법에 대하여 설명하시오.

답)

#### 1. 유중가스분석 진단 방법의 정의

유중가스분석 진단 방법이란 변압기와 같은 유입 전력기기의 냉각 및 절연을 목적으로 사용되는 절연유에 용해되어 있는 가스를 추출 분석하여 가스 양과 조성에 따라 운전 중인 변압기의 내부 이상 유무와 이상 정도를 추정할 수 있는 가장 오래되고 신뢰성이 입증된 기술이다.

#### 2. 변압기 유중가스를 이용한 상태진단

##### 1) 유중 분석 결과를 기초로 해서 유입기기의 상태를 판정할 수 있는 사항

- (1) 내부이상의 유무의 판정
- (2) 내부이상 양상의 진단(과열, 아크, 코로나에 의한 것) 및 이상진전속도
- (3) 운전계속의 가부판단 및 운전계속시의 지속적인 감시 필요성 여부
- (4) 수리여부 판단등이다.

##### 2) 절연유 내의 가스발생

- (1) 탄산가스, 수소, 메탄등이 검출되고 아세틸렌  $C_2H_2$ 가 검출되지 않은 경우

절연유가 150℃이상 가열된 경우에 발생한다. 이러한 경우에 탭 절환기 리드 접속부등에서 도전관계의 국부과열을 추정할 수 있다.

- (2) 아세틸렌이 검출된 경우

아크등으로 절연유가 1000℃이상으로 가열되면 탄산가스, 수소, 메탄등 외에 아세틸렌 ( $C_2H_2$ )이 발생한다. 아세틸렌은 아크나 부분방전등과 같은 고온에 접촉되었을 때에 발생하므로 내부에서 중대한 이상이 발생한 것으로 추정된다.

- (3) 일산화탄소(CO)가 비교적 많이 검출된 경우

일산화탄소는 절연유만 가열되어도 발생하는 일이 있으나 크라프트지(Craft Paper), 프레스보드, 베이클라이트(Baklite)등과 같은 절연재료가 수 100℃이상으로 가열되었을 때에 다량으로 검출된다.



## 3) 각 성분 GAS량에 의한 판정 기준

판정	변압기 정격		각 가스량 (ppm)					
			TCG	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO
요주의	275KV 이하	10MVA 이하	1000	400	200	150	300	300
		10MVA 이상	700	400	150	150	200	300
	500KV 이하	—	400	300	100	50	100	200
이상	275KV 이하	10MVA 이하	2000	800	400	300	600	600
		10MVA 이상	1400	800	300	300	400	600
	500KV 이하	—	800	600	200	100	200	400

표 1 가연성가스 총량 및 각 가스량에 따른 이상판정(전협 연법)

발생가스량	요주의	이상
수소(H <sub>2</sub> )	400ppm 이상	800ppm 이상
일산화탄소(CO)	300ppm 이상	600ppm 이상
아세틸렌(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	10ppm 이상	20ppm 이상
메탄(CH <sub>4</sub> )	150ppm 이상	300ppm 이상
에탄(CH <sub>6</sub> )	150ppm 이상	300ppm 이상
에틸렌(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	200ppm 이상	400ppm 이상

표 2 KEPCO (한전) 판정기준

## 4) 특정 GAS 에 의한 진단방법

(1) CO, CO<sub>2</sub> 의 검출

절연유중의 고체 절연물이 과열되면 특징적인 GAS로 CO, CO<sub>2</sub>가 발생한다. 일반적으로 유

입변압기내부에 고체절연물의 열분해에 의한 이상현상이 발생한 경우에는 중대사고로 발전할 우려가 있는 만큼 CO, CO<sub>2</sub> 에 의한 진단은 중요하다.

① CO가 많이 검출된 때는 절연지, 백크라이트 등 고체 절연물의 소손 가능성이 크다 (약 70%의 적중률이 있다)

② CO가 적게 검출된 경우에는 고체 절연물의 소손의 가능성이 적다

(2) C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 의 검출

C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>에 의한 진단은 절연유의 열분해에 의해 발생하는 가스중에서 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>는 이상현상을 구분하는데 편리한 가스중 한가지이다. 일반적으로 고온 열분해(예컨대 유중아크)가 때로 다량으로 발생하는 특징이 있지만, 접촉불량같은 과열현상이 소량 발생하는 것도 많기 때문에 다른 발생 가스와의 비교하고 진단하여야 한다.

① 아크에 의한 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>발생

유입변압기 내부에서 아크를 동반한 사고가 발생한 경우는 절연유가 고온 분해되어 일반적으로 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>가 다량 검출된다. 내부에서 아크를 발생하는 사고는 변압기에 있어서 치명적이고 보호계전기의 동작을 경우가 많다. 따라서 보호계전기가 동작하고 또한 유중가스에 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>에 다량 검출되면 내부에 중대한 손상이 발생하고 있는 것으로 추정되어야 한다.

② 부분방전에 의한  $C_2H_2$ 의 발생

변압기내부의 전위 float등에 의해 부분방전이 발생한 경우는 역시  $C_2H_2$ 가 다량 검출된다.

③ 국부과열에 의한  $C_2H_2$ 의 발생

변압기내부에서 접촉불량 등에 의한 국부과열이 생긴 경우는 파생적으로  $C_2H_2$ 가 검출되는 적이 있다. 그러나 이 경우 다른 성분가스가 양적으로 많이 발생하고  $C_2H_2$ 의 발생량은 적다. 이러한 경우에 발생하는  $C_2H_2$ 의 최대가연성 가스성분에 대한 비율은 대개의 경우 0.02이하이다.

(3)  $C_3$ ,  $C_4$  계의 검출

$C_3$ ,  $C_4$  계 가스에 의한 진단으로는 국내·외의 절연유중 GAS분석의 실태가 CO,  $CO_2$ 를 포함하는  $C_2$ 계 까지의 탄화수소 gas 의 분석으로 진단하고 있는 경우가 많지만  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas에 대해서도 조사한 결과로부터 다음 내용을 정리할 수 있다.

① 개방형 등은 오일이 대기와 접하고 있더라도 다른 가연성 gas에 비하여 기중으로의 확산량이 적다. 따라서  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas의 동향을 보면 가연성 gas의 발생동향을 확인하는 것이 쉽고, 진단의 보조로서 이용할 수 있다.

②  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas를 추출 분석한 사례를 보면  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas가 가연성 가스의 주성분으로서 발생하고 있는 사례가 적고, 발생원인의 발견 등도 적다. 발생원인에 관해서 불명확한 부분이 많다. 또한 변압기내부에서의 단락과 섬락등 중대사고 예로서는  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas가 가연성 gas의 주성분이 된 사례는 없다.

③  $C_3$ ,  $C_4$  계 gas를 분석하는 PEM 법에 의한 국부온도 추정이 가능해 진다.

(4) 특정가스의 변화에 의한 진단은  $C_2H_2$ 가 새롭게 발생 검출된 경우 또는 CO가 많이 증가한 경우 이상부의 현상황에 변화가 생기어 왔다고 판단하고, 세부적인 검토를 할 필요가 있다.  $C_2H_2$ 가 새롭게 발생한 경우는 이상부가 종래부터 고온의 현상이 있었거나 아크방전 또는 부분방전이 발생한 경우이다. CO가 이상하게 증가한 경우는 고체절연물에 이상과열이 발생한 경우다.

## (5) 그 밖의 진단방법

가연성 GAS의 경년변화에 의한 진단방법으로 추적조사에 의해 가연성 GAS량의 경년변화를 관찰하여 이상의 상태를 진단 할 수 있다.

① 가연성 GAS의 총량 또는 일부의 GAS가 급증하고 있으며 증가율이 커지는 경우, 내부이상의 진전, 확대되고 있다고 볼 수 있다.

② 가연성 GAS의 총량 또는 일부의 GAS가 일정한 비율로 점증되고 있는 경우 내부이상의 완만하게 증가하고 있기 때문에 추적조사를 계속하면, 운전을 계속하여도 좋다.

③ 가연성 GAS의 증거가 없는 경우, 내부이상의 현상이 정지하였거나 또는 발생량이 미미하게 축소된 것으로 추정할 수 있다.

## 5) GAS Pattern에 의한 분석

(1) GAS Pattern에 의한 진단방법은 횡축에 성분 GAS를 종축에 성분 GAS의 농도를 나타내서 Pattern을 그려서 그 형상으로부터 이상내용을 진단하고자 하는 것이다.

- (2) GAS Pattern의 표시법에 횡축에 가연성 GAS  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  의 순서로 하고 종축은 상기성분 GAS중 최대의 것을 1로 한 경우의 조성비를 나타냈다. 이상의 내용은  $H_2$  주도형에서는 아크 방전과 부분방전,  $C_2H_2$  주도형에서는 아크방전,  $CH_4$  및  $C_2H_4$  주도형에서는 과열에 의한 것이 주류이지만, 구체적인 이상의 양상과 상세한 Pattern 과의 결부는 곤란하다.
- (3) 변압기나 OLTC의 제조년월, 용량, 유량, 오일 열화방지 방식이 GAS Pattern에 미치게 하는 영향은 확인되지 않았다.
- (4) CO 및  $CO_2$ 는 Pattern 진단표에는 기재하지 않았지만 CO 및  $CO_2$  특히 CO 가 많이 검출되는 경우는 고체절연물이 손상을 받고 있다고 추정된다.

## 6) 수소( $H_2$ ) 주도형

### (1) Pattern

부분방전과 아크방전에 의한 이상이 많다. 아크방전에 의한 이상의 경우에는  $C_2H_2$ 의 비율이 크다.

### (2) 구체적인 사례

- ① 코일의 층간단락
- ② 코일의 용단
- ③ 탭절환기 접점간의 아크 단락
- ④ 순환전류에 의한 아크 발생 등이 있다.

## 7) 메탄( $CH_4$ ), 에틸렌( $C_2H_4$ ) 주도형

### (1) Pattern

접촉불량, 누설전류에 의한 과열의 이상이 많다.

과열이 부분방전과 아크 방전으로 발전할 경우에는 타입 C에 표시한 바와 같이  $H_2$ 나  $C_2H_2$ 의 비율이 많게 된다.

### (2) 구체적인 사례

- ① 절환기 접촉불량
- ② 접속부의 이완
- ③ 절연불량
- ④ 다점접지에 의한 국부과열 등이 있다.

## 8) 아세틸렌( $C_2H_2$ ) 주도형

### (1) Pattern

코일의 단락, 탭절환기의 섬락등의 아크 방전이 많다.

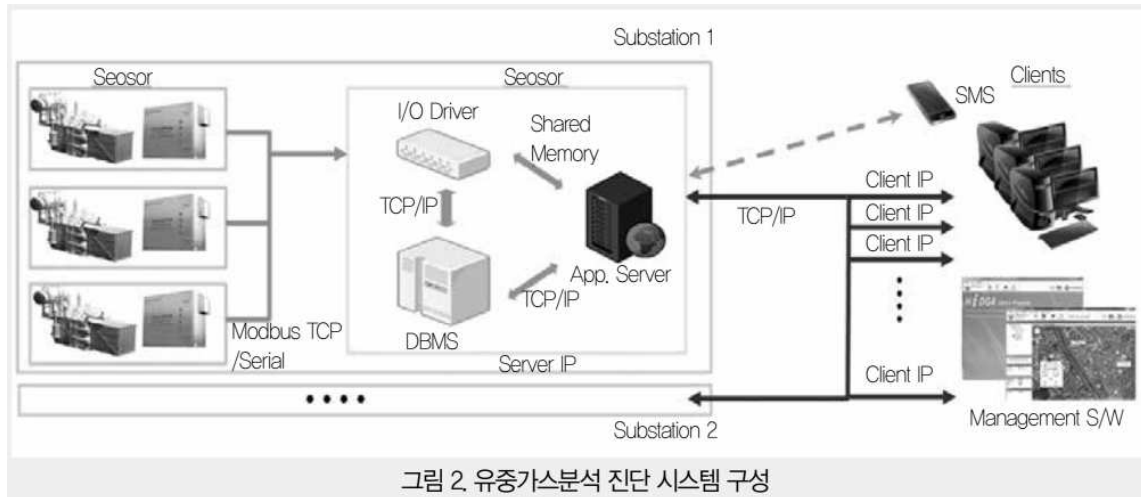
# 3. 변압기 유증가스를 이용한 고장진단 방법(온라인 진단기법)

## 1) 개요

- (1) 변압기와 같은 유입 전력기기의 내부에 특정 에너지를 가지는 절연파괴, 국부과열, 부분방전과 같은 이상 현상이 발생하거나 이상현상과 접촉한 절연유 및 절연물 등의 절연재료가 에너지의 영향을 받으면 가스가 발생하게 되고, 이들 가스는 절연유에 용해된다.

- (2) 이런 절연유에서 용해되어 있는 가스를 추출 분석하여 가스 양과 조성에 따라 전력기기의 내부 이상 유무의 이상 원인을 분석하는 유중가스분석 진단 방법은 가장 오래되고 신뢰성이 입증되어 있는 기술이다.

## 2) 구성도



3) 유증가스분석 진단으로 전력기기 내부 결함 원인을 추정하는 기법

- (1) IEEE C57.104와 IEC 60599 규격에서는 표 1과 같이 결함이 가진 에너지에 따라 6가지 종류로 분류하여 관리하고 있다.
- (2) 국제 표준 규격에서는 오일 분해, 절연체 분해, 가스 형성 패턴과 같이 유증가스가 발생하는 메커니즘을 가지고 있으며, 유입 전력기기 사용자들은 규격에 따른 진단기법으로 내부 결함을 추정하거나 결함을 검증할 수 있다.
- (3) 표 1

Faults		Meanings
Electrical Faults	PDs	Corona partial discharges of the cold plasma(corona type) with possible X-wax formation, and of the sparking type inducing small carbonized punctures in paper
	D1	Discharges of low energy, evidenced by larger punctures in paper, tracking, or carbon particles in oil
	D2	Discharges of high energy, with power follow through, evidenced by extensive carbonization, metal fusion, and possible tripping of the equipment
Thermal Faults	T1	Thermal faults of temperature $t < 300^{\circ}\text{C}$ , if paper has turned brownish
	T2	Thermal faults of temperature $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$ , If paper has turned carbonized
	T3	Thermal faults of temperature $t > 700^{\circ}\text{C}$ , Evidenced by oil carbonization, metal coloration, or fusion

표 1. 변압기 내부 결함 구분

#### 4) 고장진단 방법

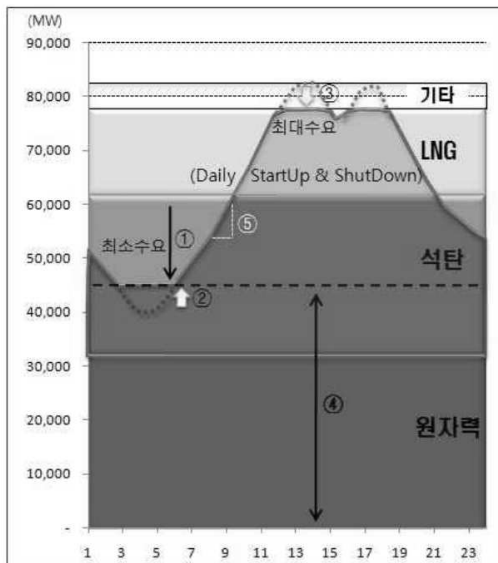
- (1) 유중가스 분석 진단 시스템은 그림2와 같이 sensor와 server, 그리고 client로 구성되어 있다.
- (2) 변압기 절연유에 용해되어 있는 가스를 실시간으로 추출하여 측정할 수 있는 센서를 변압기에 설치하고, I/O 드라이버를 통해 각 가스값을 서버로 전송하여 진단 알고리즘을 수행한다.
- (3) 사용자는 client의 S/W에서 변압기의 실시간 운전 상태를 모니터링하고, 변전소 내 변압기를 관리하게 된다.
- (4) 유중가스 진단 시스템의 주요 기능은 변압기별 상태 모니터링, 실시간 측정된 가스값 및 trend 분석, 국제 규격 알고리즘 진단 결과, 문자 및 e-mail과 같은 알람, 시뮬레이션 및 report 기능이 있다.

**4-4. 1일 부하변동과 발전소 운용의 특징 및 기저부하, 중간부하, 첨두부하 담당 발전소의 요구조건에 대하여 각각 설명하시오.**

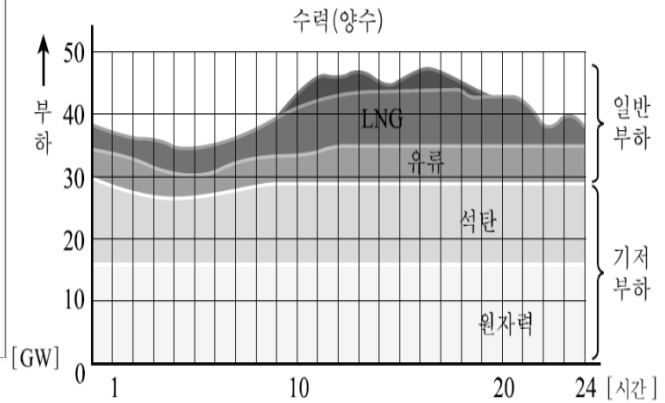
답)

**1. 1일 부하변동과 발전소 운용의 특징**

**1) 1부하 곡선**



· 일일 부하패턴(악조건) 및 급전운영 형태  
· Daily demand and supply operation



**2) 1일 부하변동과 발전소 운용의 특징**

- (1) 1일 부하변동은 위 그림에서 보는바와 같이 24시간 가동되는 부하와 심야에는 평균부하 이하로 주간에는 평균부하를 초과하는 형태로 변동한다.
- (2) 주, 야간의 차이가 현저하므로 이에 따른 발전력도 변동하여 대응하여야 한다.
- (3) 24시간 운전되는 부하에 대해서는 24시간 운전되는 발전력을 가동하고 야간 경부하시에는 발전기가 정지했다가 주간 중부하시에는 기동하는 일일기동방식을 채용하거나 부하변동에 따라 압력의 변화에 따른 출력을 변동시키는 변압운전을 실시하여야 한다.
- (4) 최대부하가 걸리는 주간 피크시에는 중용량 화력발전소나 중간부하용 화력발전소만으로는 부하변화에 대응하기 어려우므로 첨부용 발전소(양수발전, 가스터빈, 소용량 기력발전 등)를 가동시켜 대응시켜야한다.
- (5) 1일 부하변화에 대응하는 발전력
  - ① 기저공급력: 대용량고효율 화력발전, 원자력발전, 자류식(自流水) 수력발전
  - ② 중간공급력: 중용량 화력발전(既設), 중간부하용 화력발전
  - ③ 첨두공급력: gas 터빈발전, 양수 발전, 저수지식·조정지식 수력발전, 소용량 기력발전

### 3. 기저부하, 중간부하, 첨두부하 담당 발전소의 요구조건

#### 1) 기저부하담당 발전소

24시간 운전 가능하여야 하며 1일중 일정출력으로 운전하므로 건설비가 높아도 kWh당 운전비가 낮아야 한다.

##### (1) 대용량 고효율 화력발전

- ① 증기조건을 고온 고압화하여 정격출력 부근에서 연속 운전시에 최고효율이 얻어지도록 설계되어 있다.
- ② 일반적으로 시동·정지에 시간이 걸리며, 저부하운전이 어렵고, 년 이용률이 높아, 장시간 연속 base 공급력에 적당하다.

##### (2) 원자력발전

- ① 화력발전에 비해서 건설비가 높지만, 연료비가 매우 저렴하므로 경제성면에서 정격출력으로 연속 운전하는 것이 가장 적당한 운용방법이다.
- ② 부하변동이나 시동정지는 현 단계에서는 화력발전에 비해 큰 제약이 있어 출력 변화를 하지 않고 운용하므로 base 공급력으로 적당하다.

##### (3) 자류식(自流式) 수력발전

- ① 하천의 자연유량을 그대로 이용하는 발전방식이다.
- ② 이 발전방식은 하천유량을 무시하여 출력을 조정하면 무효방류가 되어 비경제적이므로 출력조정을 하지 않는다.

##### (4) 지열발전 : 지열을 열원으로 하여 기력발전 함으로 일정 출력 운전한다.

#### 2) 중간부하 담당 발전소

1일 8시간이상 운전 가능하여야 하며 1일의 부하변동에 대해서 비교적 큰 시간폭으로 대응하여 일간의 시동정지나 출력 조정이 용이해야 한다. 건설비와 운전비의 관계로 경제성은 base와 peak 공급력의 중간이다.

##### (1) 중용량 화력발전(개설既設)

- ① 이전에는 대용량 고효율 화력발전과 같이 운전을 한 것을 열효율은 약간 저하시키는 것을 감수하고, 설비를 일부 개조하여 일일 기동정지(DSS), 출력변화의 증대, 최저 출력한도의 저하 등을 도모하여 중간 공급력으로서 사용하는 발전방식이다.
- ② 정격출력으로서 100 ~ 200 만 kW급의 화력발전이 이것에 해당한다.

##### (2) 중간부하용 화력발전

매일의 시동·정지, 출력변화 속도의 증가, 건설비의 저하 등 중간부하용의 목적으로 개발한 화력발전방식으로 보일러, 터빈의 운전에 종래의 증기압력 일정운전방식대신 출력에 따라 증기압력을 변화시키는 변압운전방식을 채용한다.

#### 3) 첨두부하 담당 발전소

1일 4시간정도 운전 가능하여야 하며 급격한 부하변동에 대응하기 위해 부하추종성이 좋고, 빈번한 시동정지를 할 수 있어야 한다.

건설비가 저렴한 대신 운전코스트가 비싼 특징을 갖는다.

## (1) gas 터빈 발전

단시간의 시동정지, 낮은 시동손실, 급격한 부하의 추종성이 가능 하도록 설계한 가스터빈을 이용한 발전방식으로 1kW당 발전원가는 높으나 설비의 간소화에 의해 건설비가 낮은 특징이 있으므로 peak 공급력으로 적당하다.

## (2) 양수발전

- ① 수력발전소의 상·하부에 저수지를 설치하여 심야경부하시 base 공급력의 잉여전력으로 하부저수지의 물을 상부저수지로 양수하고, 주간의 중부하시에 상부저수지로 부터 하부저수지로 낙하시켜 발전하는 방식이다.
- ② 이 방식은 하천유량의 영향을 받지 않으므로 안정된 공급력이 되지만, 발전원가가 높아 대용량화에 의해 1kW 당 건설비를 저하시킴과 아울러 peak 시간대 (4시간 정도)에 정격출력을 유지할 수 있는 저수지용량을 확보할 필요가 있다.

## (3) 저수지식·조정지식 수력발전

- ① 저수지식은 대용량 저수지를 가지고, 월간 또는 계절적인 출력조정이 가능한 발전방식이며, 조정지식은 조정지를 갖고 일간 또는 주간 정도의 출력조정이 가능한 발전방식이다.
- ② 이러한 발전방식은 구조가 비교적 단순하고 사고가 적어 시동·정지 및 출력 변화를 급속히 행할 수 있어 peak 공급력으로서 최적이다.

## (4) 소용량 기력발전

기설의 소용량 기력발전은 효율이 낮지만 비교적 시동·정지가 용이하므로 peak 공급력으로 사용된다.



4-5. ATS(Automatic Transfer Switch)와 CTTS(Closed Transition Transfer Switch)를 비교하고, 『분산형전원 배전계통 연계 기술기준』에 따라 비상발전기를 계통에 연결하기 위한 동기화 방법을 설명하시오.

답)

## 1. ATS(Automatic Transfer Switch)와 CTTS(Closed Transition Transfer Switch)를 비교

### 1) ATS(Automatic Transfer Switch)

수, 변전 설비에서 한전 라인과 비상발전기 라인 두 전원선을 연결하여 한전 라인 단전 시 비상발전기가 동작하도록 자동으로 절제되는 스위치.

### 2) CTTS(Closed Transition Transfer Switch)

일반적인 ATS의 개방절체와 달리 폐쇄형 절체로서 미리 발전기를 가동시켜 위상각, 정전압, 정주파수 확립 시 한전 전원과 발전기 전원의 주파수 및 전압 동기가 확립되면 100ms 이내 동안 병렬운전을 한 후 무정전으로 발전기 측으로 절체되는 스위치.

### 3) 비교

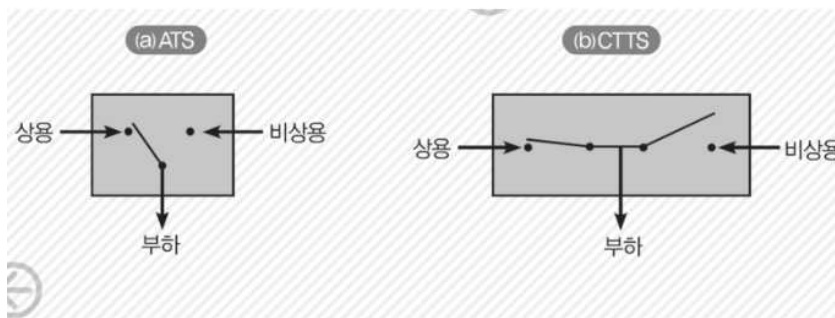


그림1. ATS와 CTTS의 접점 비교

절체시 20~90ms의 순단이 발생	위상각 5° 이내, 주파수 0.2Hz 이내, 전압차 5% 이내에서 동기됨 동기가 맞는 시점에 중첩되어 절체되므로 순단이 없음 전원 절체시 선투입 후개방 방식임
---------------------	--

## 4) CTTS(Closed Transition Transfer Switch)의 장점

### (1) 발전기보호

CTTS는 무정전으로 동기를 맞추어 전환되기 때문에 발전기측에 스트레스를 주지 않으며 그에 따른 발전기 수명연장에도 도움이 됩니다.

### (2) UPS 및 UPS BATTERY의 보호 및 수명연장가능

CTTS는 무정전으로 절체동작이 이루어지기 때문에 축전지의 사용 확률을 낮춤과 동시에 UPS 인버터의 오동작 가능성을 감소시킬 수 있어 수명연장과 기기보호가 가능합니다.

## (3) 전동기, 기타 전산장비의 보호 및 수명연장가능

항온항습기 등과 같이 정전과 복전에 따른 리셋을 할 필요가 없어지므로 관리가 용이합니다.

## (4) UPS 인버터 고장시 중요부하 보호가능

UPS의 인버터 고장시 발전기를 미리 가동 시킨 후, UPS의 SBS(Static Bypass Switch)를 이용하여 발전 측으로 미리 무정전 절체시켜 놓으면 한전의 순간정전이나 주파수 변동에 대하여 대처가 가능합니다.

## 2. 비상발전기를 계통에 연결하기 위한 동기화 방법

분산형전원의 계통 연계 또는 가압된 구내계통의 가압된 한전계통에 대한 연계에 대하여 병렬연계 장치의 투입 순간에 <표 2.2>의 모든 동기화 변수들이 제시된 제한범위 이내에 있어야 하며, 만일 어느 하나의 변수라도 제시된 범위를 벗어날 경우에는 병렬연계 장치가 투입되지 않아야 한다.

<표 2.2> 계통 연계를 위한 동기화 변수 제한범위

분산형전원 정격용량 합계(kW)	주파수 차 ( $\Delta f$ , Hz)	전압 차 ( $\Delta V$ , %)	위상각 차 ( $\Delta \Phi$ , °)
0 ~ 500	0.3	10	20
500 초과 ~ 1,500	0.2	5	15
1,500 초과 ~ 20,000 미만	0.1	3	10

4-6. 22.9[kV] 3상4선식 계통에서 3상 단락전류  $I_s$ , 1선지락 고장전류  $I_g$ 를 구하시오.  
(단, 주변압기 자기용량은 3상 50[MVA]이고, 100[MVA]기준 정격전류( $I_n$ ) 및 1[Ω]당 고장저항값의 %Z는 각각 2500[A], 20[%]로 계산할 것)

< 계산조건 >

- 1) 계통의 %Z (100[MVA]기준) : 15[%]
- 2) 주변압기 %Z (자기용량에서) : 2.5[%]
- 3) 선로의 정상 %Z (100[MVA]기준) : 30[%]
- 4) 선로의 영상 %Z (100[MVA]기준) : 45[%]
- 5) 1선지락 시 고장저항 값 : 5 [Ω]

답)

## 1. 3상 단락전류 계산

### 1) %임피던스 환산

100[MVA] 기준, 기준전류 2500[A], 3상 단락고장은 정상상태만 해석하기 때문에 정상 임피던스만을 고려하여 계산한다.

$$(1) \text{ 계통 } \%Z = 15\% \times \frac{100}{100} = 15\%$$

$$(2) \text{ 변압기 } \%Z = 2.5\% \times \frac{100}{50} = 5\%$$

$$(3) \text{ 선로 } \%Z = 30\% \times \frac{100}{100} = 30\%$$

(4) 총 %Z

$$\%Z_T = 15 + 5 + 30 = 50[\%]$$

(5) 단락전류  $I_s$

$$I_s = \frac{100}{\%Z} I_n = \frac{100}{50} \times 2500 = 5,000[\text{A}]$$

## 2. 1선지락 고장전류 계산

100[MVA] 기준, 기준전류 2500[A], 주어진 조건에 계통 %Z 값에 대한 명확한 기준이 없으므로 계통의 영상, 정상, 역상 임피던스는 같다고 보고 선로의 정상, 역상 임피던스는 같다고 본다. 또한 변압기의 영상, 정상, 역상 임피던스는 정지기이므로 같다고 본다.

**1) 영상 임피던스  $\%Z_0$** 

(1) 선로  $\%Z_0 = 45\%$

(2) 변압기  $\%Z_0 = 2.5\% \times \frac{100}{50} = 5\%$

(3) 계통  $\%Z_0 = 15\%$

(4) 총 영상 임피던스  $\%Z_{0T} = 45 + 5 + 15 = 65[\%]$

**2) 정상 임피던스  $\%Z_1$** 

(1) 선로  $\%Z_1 = 30\%$

(2) 변압기  $\%Z_1 = 2.5\% \times \frac{100}{50} = 5\%$

(3) 계통  $\%Z_1 = 15\%$

(4) 총 정상 임피던스  $\%Z_{1T} = 30 + 5 + 15 = 50[\%]$

**3) 역상 임피던스  $\%Z_2$** 

정상  $\%Z$ 와 같으므로  $\%Z_2 = 50[\%]$

**4) 지락저항**

영상회로에 포함되지 않고  $1\Omega$ 당 20%라 했으므로

$$\%R_f = 20 \times 5 = 100 [\%]$$

**5) 지락전류 계산**

$$I_g = \frac{3 \times 100}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2 + 3 \times \%R_f} I_n = \frac{3 \times 100}{65 + 50 \times 2 + 300} \times 2500 = 1612.9[A]$$