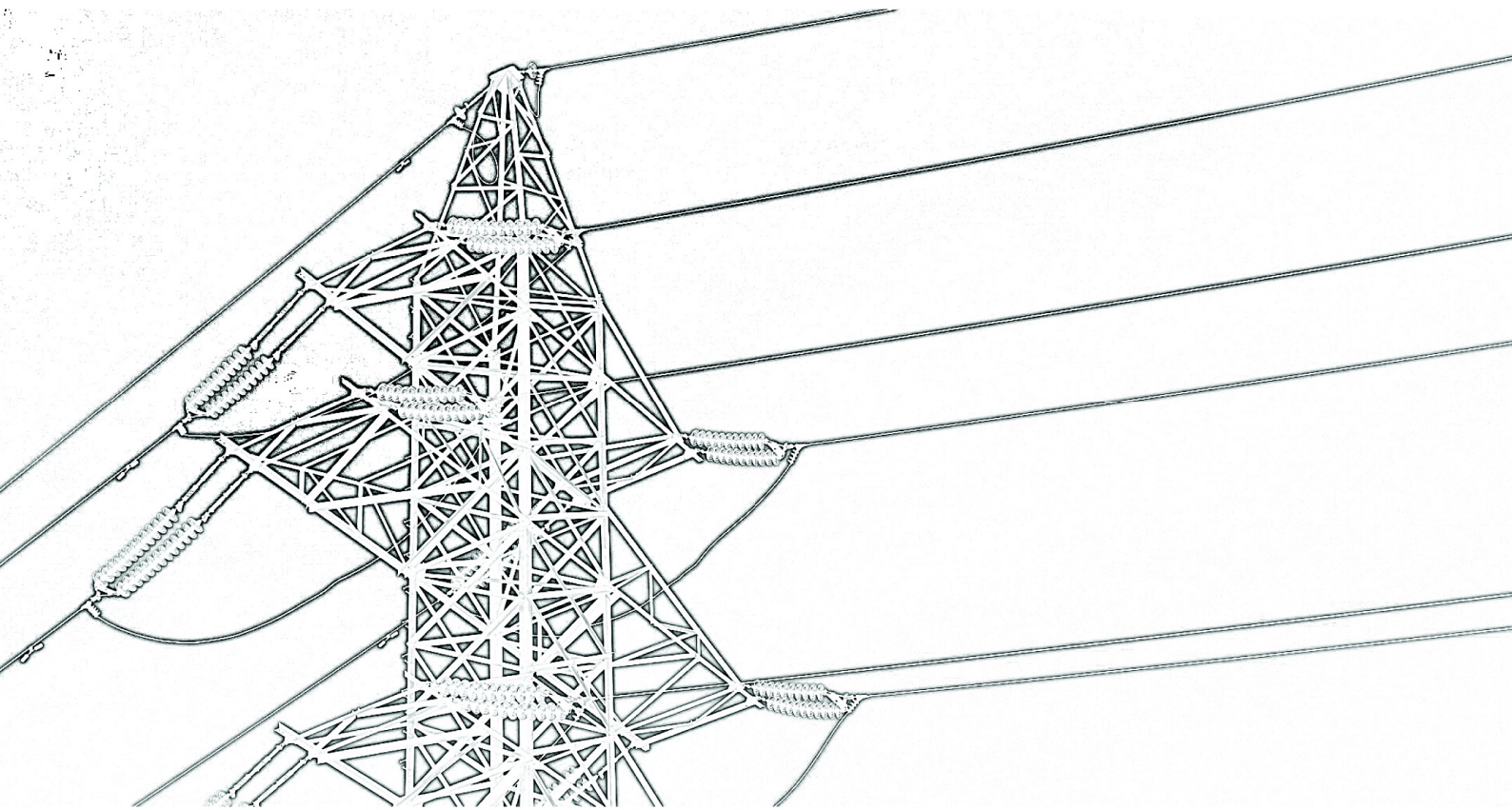


제 115회 필기시험 문제풀이

발송배전기술사

교수: 하용일



소방전기교육전문학원

(주) 모아전기학원

MOA Technical Education

대표 (02) 2068-2851 FAX. 02) 2068-2881

www.moate.co.kr

»모아는 Challenge다«
전기분야의 Legend, 모아전기학원

제 115회 발송배전기술사

[문제풀이집]

교수: 하용일

Legend 모아전기학원의 자랑!

모아전기학원 2012~2018년

전체수강생의 1/7을 합격시킨, 진정한 Legend!

“실제 수강생 대비 합격률 대한민국 1위”

강의만족도 90%, 강의평균 재수강률 80%

“7년간의 검증” 모방이 불가능한 커리큘럼

열정적으로 2018년을 준비합니다.

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 88~110시간확보)
- ▶ 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 무료제공!

- ▶ 동영상(PC+모바일)을 통한 공부환경의 극대화!

다섯 번째: 스터디 룸 무료제공!

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

모아전기학원 / 건축전기설비기술사 개강일정

건축전기설비기술사 (왕모아 원장)			
CLASS	개강일정 (11주)		교재
건축전기의 중요엑심 "SGN 기본반"	5월 27일 ~ 8월 05일	일 (15시~20시)	모아건축기술사 +보충자료
영문있는 답안작성 "SBR 연구반"	5월 27일 ~ 8월 05일	일 (10시~18시)	모아건축기술사 +Sub note

모아전기학원 / 발송배전기술사 개강일정

발송배전기술사 (아용일 교수)			
CLASS	개강일정 (11주)		교재
절제한 기본주의 "토요 기본반"	6월 09일 ~ 8월 18일	토 (15시~21시)	발송기본3권(송길영) 동일출발사
고정관념 제거 "심화연구반"	5월 26일 ~ 8월 04일	토 (09시~15시)	자체교재

모아전기학원 / 전기안전기술사 개강일정

전기안전(응용)기술사 (오부영 교수 / 왕모아 원장)			
CLASS	개강일정 (11주)		교재
알 수 있는 공부 "SGN특강반"	5월 26일 ~ 8월 04일	토 (15시~20시)	모아전기안전기술사 +보충자료
마우리토론과모의고사 "SGN연구반"	5월 26일 ~ 8월 04일	토 (10시~15시)	모아전기안전기술사 +보충자료

제 1 교시 문제풀이

1-1 Faraday의 전자유도 법칙(Low of electromagnetic induction)을 설명하시오.

답)

1. Faraday의 전자유도 법칙(Low of electromagnetic induction) 설명

1) 정의

회로 외부에 형성된 자기장의 변화가 발생할 때, 기전력이 발생하는 현상을 말한다.

2) 관계식

일반적으로 N개의 도체가 Δt 초간에 $\Delta \Phi$ [Wb]의 자속을 차단했을 때 발생하는 유도 기전력의 크기 e 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$e = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ [V]}$$

N: 코일의 감은 횟수 [Turn], $\Delta \Phi$: 자속의 변화 [Wb], Δt : 시간의 변화 [sec]

3) 설명

- (1) N극과 S극간에 도체를 놓고 상하로 움직이면 검류계 지침이 좌우로 흔들린다.
- (2) 원통에 코일을 감고 코일 내에 막대자석을 넣거나 뺄 때 검류계 지침이 좌우로 움직인다.
- (3) 패러데이는 전류가 자계를 만든다는 것에서 자기에서 전기를 만들 수 있다고 생각하고 (1), (2)의 실험을 하여 다음과 같이 정리하였다.
 - ① 도체가 자속을 차단하면(끊으면) 기전력이 발생한다.
 - ② 코일에 교차하는 자속수가 변화하면 기전력이 생긴다.
 이러한 현상을 전자유도라 한다.
- (4) 유도된 기전력을 유도기전력이라 하고 흐른 전류를 유도전류라 한다.
- (5) 전자유도에 의해 코일이나 도체에 생기는 기전력의 크기는 코일이나 도체와 교차하는 자속수가 1초간에 변화하는 비율에 변화한다.
- (6) 전자유도에 의해 생기는 기전력에 대해서는 1개의 도체가 1초간에 1Wb의 자속을 차단했을 때 1V의 기전력이 발생한다.
- (7) 기전력은 자기력의 시간적 변화와 코일 회로의 감은 횟수에 비례한다.
- (8) 여기서 부호가 (-)인 것은 자기력의 변화 방향과 반대로 기전력의 방향이 발생한다는 것이다.

1-2 가공전선의 굵기 결정 시 검토사항을 설명하시오.

답)

1. 가공전선의 굵기 결정 시 검토사항 설명

1) 허용전류

(1) 정의

전선에 전류가 흐르면 저항손의 발열에 의해 전선의 온도가 올라가고 이 온도상승의 한계를 최고 허용온도라 하며 이에 대응하는 전류를 허용전류라 한다.

(2) 온도 적용 기준

① 단시간 과부하에 대하여 100℃

② 연속 장시간 사용 시 90℃

③ 주위온도 40℃, 일사량 0.1[w/cm²], 풍속 0.5[m/sec]를 기준으로 한다.

(3) 전선이 굵을수록 저항이 작아져서 온도상승이 적으므로 허용전류가 커지는데 이를 안전 전류라 한다.

(4) 단거리 송전선로에서는 허용전류로서 송전용량이 결정되어 진다.

2) 기계적 강도

(1) 가공전선은 전선 자중뿐만 아니라 착빙설, 댐퍼를 비롯한 부착 금구의 하중, 그리고 각종 풍압에 의한 진동 등에도 단선되지 않도록 충분한 강도가 요구되므로 전선 굵기를 선정할 때는 허용전류 조건뿐만 아니라 기계적 강도도 고려하여야 한다.

(2) ACSR의 경우 바깥 부분의 경알루미늄이 도체 역할을 하고 있지만 기계적 강도가 16~18 [kg/mm²]로 작으므로 이를 보완하기 위해서 가운데에 강연선(인장강도 125 [kg/mm²])을 사용해서 기계적 강도를 크게 한다.

3) 전압강하

(1) 단거리 송전선로의 전압강하 식

$$e = V_s - V_r \doteq \sqrt{3} I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

(2) 저항

$$R = \rho \frac{l}{A} \propto \frac{1}{A}$$

(3) $e \propto R \propto \frac{1}{A}$ 로서 단면적이 클수록 전압강하는 줄어들며, 일반적으로 전압강하율이 5[%] 이하가 되도록 전선 굵기를 정한다.

4) 전력손실 및 코로나손

(1) 저항 R에 의한 손실 및 송전계통의 경우 특히 코로나 손 줄이기 위해서는 굵은 전선을 사용해야 한다.

(2) 손실률도 보통 5[%]를 넘지 않도록 전선 굵기를 선정한다.

5) 경제성

(1) 켈빈의 법칙

① 정의

켈빈의 법칙이란 건설 후에 전선의 단위길이를 기준으로 해서 여기에 1년간 잃게 되는 손실 전력량의 금액과 건설시 구입한 단위길이의 전선비에 대한 이자와 상각비를 가산한 연경비가 똑같게 되도록 하는 굵기가 가장 경제적인 굵기가 된다는 것이다.

② 전류밀도

$$\sigma = \sqrt{\frac{wMP}{\rho N}}$$

여기서, M: 전선1[kg]의 가격 [원], N: 1년간 전력량의 요금(원)

P: 1년간의 이자와 상각비와 합계, A: 전선의 굵기[mm²]

w: 전선의 무게 [kg/m • mm²], ρ : 고유저항 [Ω/m • mm²]

③ 경제적인 전선의 굵기

$$A = \frac{I}{\rho} [\text{mm}^2]$$

(2) 켈빈의 법칙에 의해서 결정되는 굵기는 허용전류에 의한 굵기보다는 훨씬 작아진다.

6) 장래 전망

장기계획과 기술적 전망 등을 고려하여 전선의 선택에 반영한다.

1-3 60 Hz 정현파 교류의 파형을 그리고 최대치와 실효치의 관계와 의미를 설명하시오.

답)

1. 60 Hz 정현파 교류의 파형 그리기

1) 전압파형 V

$$(1) V = V_m \sin \theta [V] = V_m \sin \omega t [V] = V_m \sin 2\pi f t [V] = V_m \sin 120\pi t [V]$$

여기서 V_m : 전압 최대값, θ : 위상각, ω : 각속도[rad], f : 주파수 = 60[Hz][cycle/sec]

(2) 주기 T

정해진 1cycle을 진행하는데 걸리는 시간

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60} \simeq 16.6[\text{ms}]$$

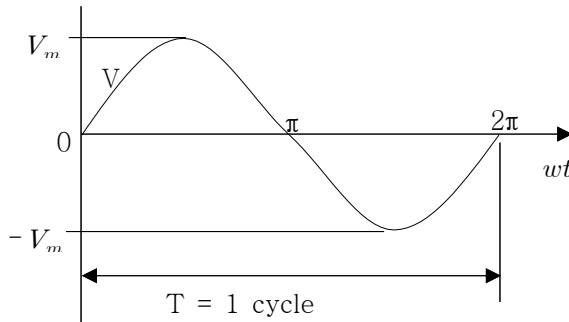
(3) 주파수 f

1초 동안 반복되는 주기의 수로 f 는 60 [Hz] 이므로 1초간에 sin파 1주기가 60번 반복한다.

(4) 각 주파수

- ① 1 사이클이 종료되면 $2\pi [\text{rad}]$ 진행하고 2 사이클에 $2\pi \times 2 = 4\pi [\text{rad}]$, f 사이클에 $2\pi \times f = 2\pi f [\text{rad}]$ 진행한다.
- ② 주기가 $f[\text{Hz}]$ 인 경우 1초간에 $2\pi f [\text{rad}]$ 진행한다.
- ③ $2\pi f$ 를 ω (오메가)로 표시하고 이것을 각 주파수라 하며 $\omega = 2\pi f [\text{rad}]$ 로 표현된다.
- ④ ω 는 1초 동안에 진행하는 각도이므로 t 초 동안에 변화하는 각도는 $\omega t = 2\pi f t [\text{rad}]$ 이 된다.

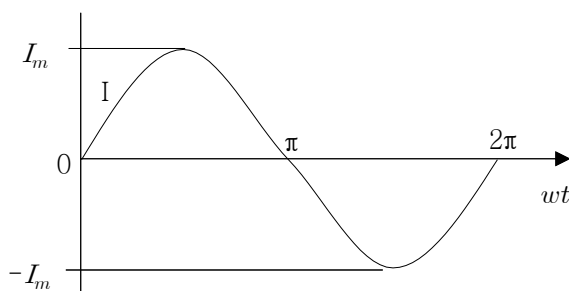
(5) 전압파형 그리기



2) 전류파형 그리기

(1) 전류파형 I

$$I = I_m \sin \theta = I_m \sin \omega t = I_m \sin 2\pi f t = I_m \sin 120\pi t [A]$$



2. 최대치와 실효치의 관계와 의미를 설명

1) 최대치

(1) 정의

정현파 교류에서 최대로 되는 값으로 직류에서는 최대값이 직류값이 된다.

(2) 표현

일반적으로 전압은 V_m , 전류는 I_m 으로 표시된다.

2) 실효치와 최대치의 관계와 의미

(1) 실효치의 정의

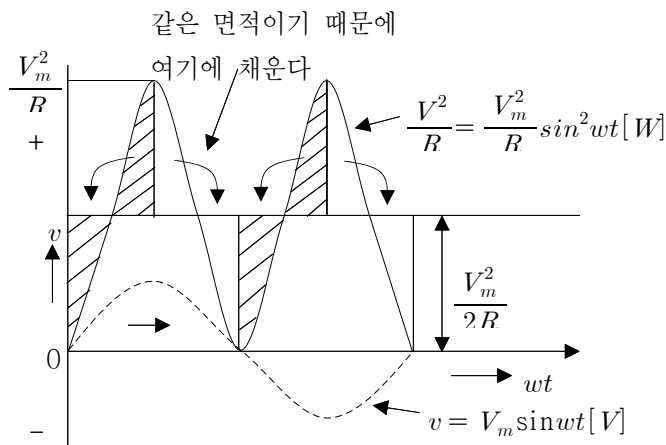
교류의 크기를 교류와 동일한 일을 하는 직류의 크기로 바꿔 나타냈을 때 값. 동일 전력의 의미.

(2) 실효치의 의미

- ① 직류로 전구를 밝힐 때 직류전원이 $V[V]$ 이고, 교류전원으로 똑같은 전구 밝기가 될 때 교류전원이 $e[V]$ 라고 하면 교류전압 $e[V]$ 와 직류전압 $V[V]$ 는 똑같은 일을 한 것이 된다.
- ② 이때의 직류전압 $V[V]$ 를 교류전압 $e[V]$ 의 실효값이라 한다. 전류도 동일하다.
- ③ 실효값은 교류 전압이나 교류가 전력으로 소비될 때 실제로 효력이 있는 값이다.
- ④ 교류에서는 순시치가 아닐 때는 모두 실효값으로 표현한다.

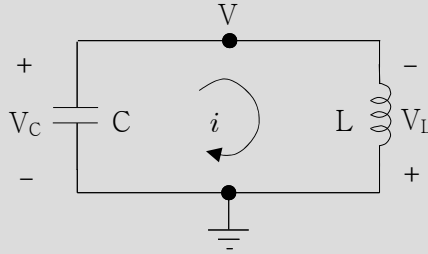
(3) 실효값 구하기

- ① 직류전력의 식은 $P = VI = \frac{V^2}{R}[W]$ 이다.
- ② 교류전력 p 의 경우에도 교류전압 e 를 제공한 값을 R 로 나눈 값이 된다.
- ③ $e = V_m \sin \omega t [V]$ 라 하고 e 를 제곱해서 R 로 나눈 파형의 최대값은 $\frac{V_m^2}{R}$ 이 된다.
- ④ 실효값을 구하기 위해서 사인파형의 위, 아래를 매우면 높이가 $\frac{V_m^2}{2R}$ 이 된다.



- ⑤ 직류전압 V 에 의한 직류전력은 $\frac{V^2}{R}$ 이다.
- ⑥ 실효값의 정의에 의해 $\frac{V_m^2}{2R} = \frac{V^2}{R}$ 식이 성립한다.
- ⑦ 실효값 $V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \times \text{최대값}$ 이 된다. 전류의 경우도 동일하며 $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ 이 된다.

1-4 그림과 같이, 전원이 제거된 후 두 초기조건(즉, 초기전류 $i(0)=0$, 초기전압 $V_C(0)=V_0$)에 의하여 동작하는 LC 회로가 있다. 시간 $t \geq 0$ 일 때 이 회로에 흐르는 전류를 $i(t)$ 라고 하자. 전류 $i(t)$ 로 표시된 미분방정식을 구하시오.



답)

1. 전압법칙에 의한 미분방정식 유도

- 1) 초기 콘덴서에 q_0 의 전하가 충전되어 있고 $t = 0$ 에서 스위치를 닫으면 전하는 반대편 충전 판으로 이동을 시작하며 회로에 전류를 형성한다. 이때 전압법칙은 다음과 같다.

$$V_L + V_C = 0, \quad L \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} = 0, \quad \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0$$

2) 회로의 에너지 보존에 의한 미분방정식 유도

회로의 에너지를 시간으로 미분한다.

$$U = U_L + U_C = \frac{1}{2}Li^2 + \frac{q^2}{2C}$$

$$\frac{dU}{dt} = Li \frac{di}{dt} + \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = 0, \quad \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0$$

3) LC 회로의 미분방정식 풀이

- (1) $i = \frac{dq}{dt}$ 이므로 미분방정식은 축전기의 전하 q 에 대한 시간의 2차 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{LC}q = 0, \quad \frac{d^2q}{dt^2} + w^2q = 0, \quad \text{여기서 } w = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{로 각 진동수이다.}$$

- (2) 미분방정식의 해를 $q = Ke^{rt}$ 라 하고 이것을 미분하여 r 의 값을 구한다.

$$\frac{dq}{dt} = Kre^{rt}, \quad \frac{d^2q}{dt^2} = Kr^2e^{rt}$$

$$Kr^2e^{rt} + w^2Ke^{rt} = Ke^{rt}(r^2 + w^2) = 0, \quad r = \pm jw$$

$$\text{여기서 } j = \sqrt{-1}$$

(3) 일반해

$$q = K_1 e^{jwt} + K_2 e^{-jwt}$$

오일러의 공식 $e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$ 를 적용하면

$$q = (K_1 + K_2)\cos wt + j(K_1 - K_2)\sin wt$$

여기서 상수 $A = K_1 + K_2$, $B = j(K_1 - K_2)$ 라 하면 계수 A, B는 경계조건에서 결정되는 상수이다.

$$q(t) = A\cos wt + B\sin wt$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -Aw\sin wt + Bw\cos wt$$

(4) 초기조건에 의한 A, B 산출

초기 $t=0$ 에서 콘덴서는 q_0 으로 충전되어 있었다면

$$q(0) = q_0 = A$$

초기 $t=0$ 에서 회로에 전류가 흐르지 않으므로 $i(0) = 0 = B$

(5) 완전해

$$q(t) = q_0 \cos wt$$

(6) $i(t)$ 로 표시된 미분방정식

축전기의 전하 $q(t)$ 를 이용하여 축전기의 시간에 따른 전압 $V_c(t)$ 와 회로에 흐르는 전류 $i(t)$ 를 나타내면

$$V_c(t) = \frac{q(t)}{C} \cos wt, \quad V_c(0) = \frac{q(0)}{C} = \frac{q_0}{C} = V_0, \quad \text{여기서 } q_0 = CV_0, \quad w = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -CV_0 w \sin wt = \sqrt{\frac{C}{L}} V_0 \cos\left(wt + \frac{\pi}{2}\right)$$

1-5 태양광발전 시스템에서 인버터의 역할과 인버터 회로 절연방식인 아래의 3가지 방식을 설명하시오.

상용주파 변압기 절연방식, 고주파 변압기 절연방식, 트랜스리스(Transless) 방식

답)

1. 태양광발전 시스템에서 인버터(power conditioner)의 역할

- 1) 태양광 발전에서 발전된 직류를 교류로 변환하여 계통에 공급할 수 있게 해준다.
- 2) 일사강도가 증대하여 발전조건이 되면 자동으로 운전을 시작하고 일몰 후 출력을 얻을 수 없을 때는 정지, 흐린 날 또는 비오는 날은 대기상태를 유지한다.
- 3) 태양전지의 동작점이 항상 최대전력을 추종하도록 변화시켜 최대출력을 얻을 수 있도록 제어한다.
- 4) 한전계통이 정전에 의한 단독운전 발생 시 배전망에 전기가 공급되어 보수점검자에 위해를 가할 수 있으므로, 한전계통 정전 시에 이를 수동적 혹은 능동적으로 검출하여 태양광 발전 시스템을 안전하게 정지하게 한다.
- 5) 태양광 계통에 접속하여 역전송 운전 시 수전점의 전압이 상승하여 운영범위가 넘어섬을 방지한다.
- 6) 주파수 이상이나 과부족 전압 등 계통 측과 인버터의 이상 및 단독운전 등을 검출하여 인버터를 정지시킴과 동시에 계통과의 연계를 빠르게 단절함에 의해 계통 측의 안전을 확보한다.

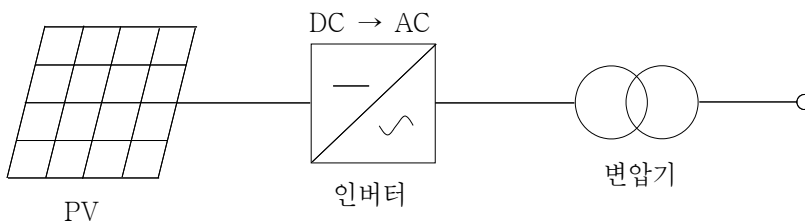
2. 태양광발전 시스템에서 인버터 회로절연 방식

1) 상용주파 변압기 절연방식

(1) 원리

태양전지 직류출력을 상용주파의 교류로 변환한 후 변압기로 절연하는 방식.

(2) 구성도



(3) 특징

- ① 제어부가 가장 간단하여 안정성이 우수하다.
- ② 내뇌성 및 노이즈 커트 특성이 우수하다.
- ③ 변압기 때문에 효율이 떨어지고 부피와 무게가 커진다.

(4) 적용

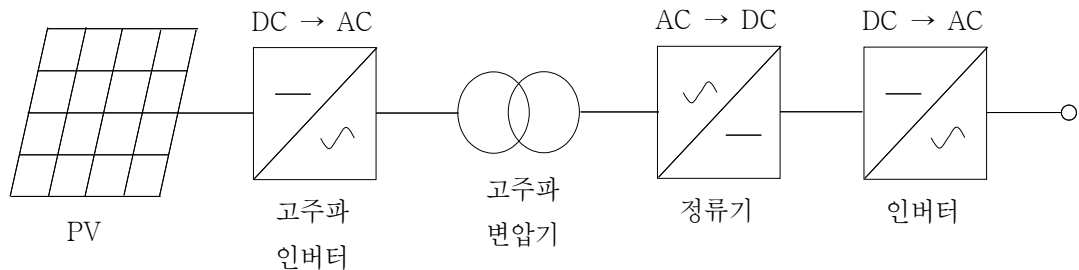
3상 10kW 이상에 주로 적용한다. (주로 복권변압기 적용 방식이다)

2) 고주파 변압기 절연방식

(1) 원리

태양전지 직류출력을 고주파의 교류로 변환한 후, 소형 고주파 변압기로 절연한 후 일단 직류로 변환하고 다음 사용주파수 교류로 변환한다.

(2) 구성도



< 고주파 변압기 절연방식 >

(3) 특징

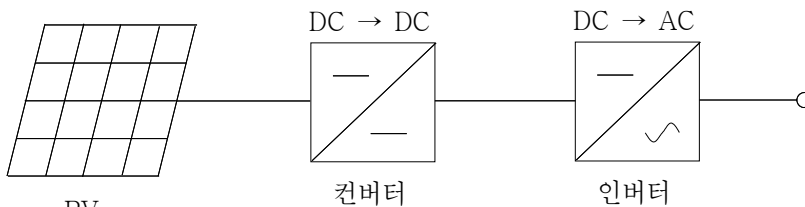
- ① 저주파 절연변압기를 사용하지 않기 때문에 고효율화, 소형경량화, 저가화가 가능하다.
- ② 많은 파워소자로 구성이 복잡하다.

3) 트랜스리스 방식

(1) 원리

태양전지 직류출력을 DC-DC 컨버터로 승압하고 DC/AC 인버터로 상용 주파의 교류로 변환한다.

(2) 구성도



< 트랜스리스 방식 >

(3) 특징

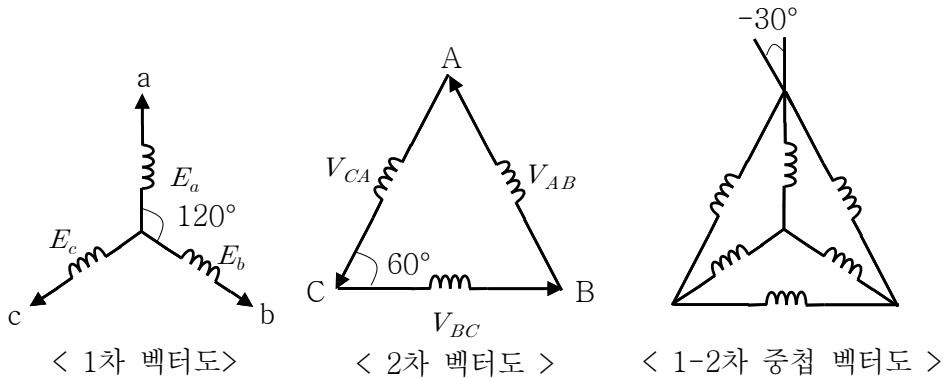
- ① 저주파 변압기를 사용하지 않기 때문에 고효율화, 소형경량화, 저가화에 가장 유리하다.
- ② 주택용 (3kW 이하), 소형 등에 많이 적용되는 절연방식이다.
- ③ 변압기를 사용하지 않기 때문에 안정성에 불리하다.
- ④ 복잡한 안정성 제어가 필요하다.

1-6 변압기의 Y-△, △-Y, △-△, Y-Y결선에서 전압의 각변위(angle displacement)에 대하여 설명하시오.

답)

1. Y-△ 결선의 전압의 각 변위

1) 벡터도

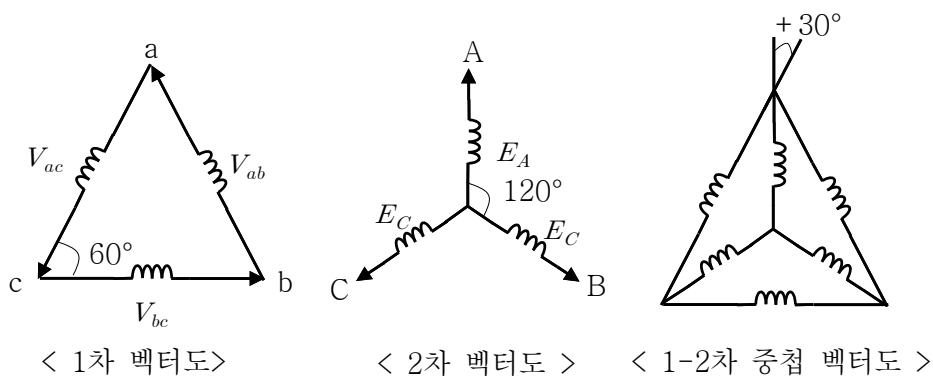


2) 각 변위

- (1) 그림에서 1차 측 선간전압을 기준벡터로 했을 때 2차 측 선간전압은 기준벡터보다 시계방향으로 30도 회전한 것을 볼 수 있다.
- (2) 2차 측 선간전압은 1차 측 선간전압보다 30도 위상이 뒤진다.

2. △-Y 결선의 전압의 각 변위

1) 벡터도



2) 각 변위

- (1) 그림에서 2차 측 선간전압을 기준벡터로 했을 때 1차 측 선간전압은 기준벡터보다 반시계방향으로 30도 회전한 것을 볼 수 있다.
- (2) 2차 측 선간전압은 1차 측 선간전압보다 30도 위상이 앞선다.
- (3) Y-△, △-Y 결선이든 Y 결선 측의 위상이 30도 앞선다.

3. △-△, Y-Y결선에서 전압의 각 변위

1차, 2차 결선이 같으므로 전압이 각 변위는 0이 된다.

1-7 동기발전기의 전기자 반작용의 영향과 대책에 대하여 설명하시오.

답)

1. 전기자 반작용 정의

- 1) 무부하 일 때 계자 전류가 일정하면 공극의 자속 Φ 도 일정하므로 기전력도 일정하다.
- 2) 부하가 접속되어 전기자 권선에 전류가 흐르면 자속이 발생되어 주자속(계자자속)에 영향을 주어 공극의 자속분포가 변화하므로 유기기전력이 변하게 되는데 이러한 현상을 전기자 반작용이라 한다.
- 3) 전기자 전류의 크기, 권선의 분포, 자기 회로의 자기저항, 부하의 역률 등에 따라 전기자 반작용은 다르게 된다.

2. 전기자 반작용의 영향

- 1) 감자작용으로 주자속의 감소로 유기기전력이 감소하여 발전기 효율이 감소한다.
- 2) 심야 경부하시에 증자작용으로 발전기자기여자현상을 유발시킨다.
- 3) 증자와 감자작용으로 전압의 변동을 유발해 송수전단 전압을 일정하게 운전하는 정전압 송전이 어려워진다.

3. 전기자 반작용 대책

1) 감자 작용 시

- (1) 수전단에 콘덴서, SVC, STATCON 등 무효전력 공급설비를 투입한다.
- (2) 발전기, 동기조상기 과여자 운전한다.
- (3) 변압기 탭을 ULTC, LRC, LRT등으로 조정하여 전압을 올린다.

2) 증자 작용 시

- (1) 수전단에 Shr, SVC, STATCON 등 무효전력 소비설비를 투입한다.
- (2) 발전기, 동기조상기 저여자 운전한다.
발전기 진상운전시 안정도, 고정자 단부 과열, 소내동력 저하 등에 주의한다.
- (3) 변압기 탭을 ULTC, LRC, LRT등으로 조정하여 전압을 내린다.

1-8 2대의 발전기의 증분연료비(incremental fuel cost)가 $\lambda_1 = df_1 / dP_1 = 0.012P_1 + 8.0$, $\lambda_2 = df_2 / dP_2 = 0.008P_2 + 9.6$ 이고, 총 부하가 400MW이니, 선로손실을 무시할 때, 발전비용이 최소가 되는 최적 발전출력 P_1 , P_2 를 구하시오.
(단, f_1 , f_2 의 단위는 원/hour, P_1 , P_2 의 단위는 MW이다)

답)

1. 수급조건

$$P_1 + P_2 = 400$$

2. 목적함수

$$F = F_1 + F_2$$

3. 평가함수 Φ

$$\Phi = F_1 + F_2 - \lambda(P_1 + P_2 - 400)$$

4. 발전비용이 최소가 되는 조건

$$\frac{\partial \Phi}{\partial P_i} = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial P_1} = \frac{dF_1}{dP_1} - \lambda(1) = 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial P_2} = \frac{dF_2}{dP_2} - \lambda(1) = 0$$

5. 등증분 연료비의 원칙

$$\lambda = \frac{dF_1}{dP_1} = \frac{dF_2}{dP_2}$$

6. 발전비용이 최소가 되는 최적 발전출력 P_1 , P_2 계산

$$\lambda = \lambda_1 = \lambda_2 \text{ 이므로}$$

$$0.012P_1 + 8 = 0.008P_2 + 9.6$$

$$0.012P_1 - 0.008P_2 = 1.6$$

$$3P_1 - 2P_2 = 400 \text{ 과 } P_1 + P_2 = 400 \text{ 을 연립방정식으로 풀면}$$

$$P_1 = 240 \text{ MW, } P_2 = 160 \text{ MW일 때 발전비용이 최소가 되는 최적 발전출력이 된다.}$$

1-9 송전선로에서 송전용량을 산정할 때 선로의 열적 한계(thermal limit), 전압강하 한계(voltage drop limit), 정상상태 안정도 한계(steady-state stability limit)를 고려하여야 한다. 이 3가지 한계에 대하여 설명하시오.

답)

1. 송전능력의 정의

선로가 얼마만큼의 전력을 송전할 수 있는가 하는 능력

2. 열적 한계(thermal limit)

- 1) 단거리 송전선로에서 적용한다.(약 80km 이하)
- 2) 열적한계는 송전선로가 정상적으로 운전할 수 있는 온도의 한계에 의해 결정되며, 주위온도 40℃를 표준으로 했을 때 전류가 흐름으로 인해 발생하는 주열에 의한 온도상승 값을 더하여 허용한계온도가 결정된다.
- 3) 한계온도는 단시간 과부하에 대해서는 100℃, 장시간 연속 사용 시에는 전선의 접속장소의 열화를 고려하여 90℃를 표준으로 하고 있다.
- 4) 가공송전선로는 여름의 주위온도를 40℃를 기준으로 전선의 온도상승은 장시간 연속상태에서는 50℃를, 단시간인 경우에는 60℃를 상정하고 허용전류를 이 범위 이내로 하고 있다.
- 5) 열적 제한용량은 이 전류에 전압을 곱하여 결정된다.

3. 전압강하 한계(voltage drop limit)

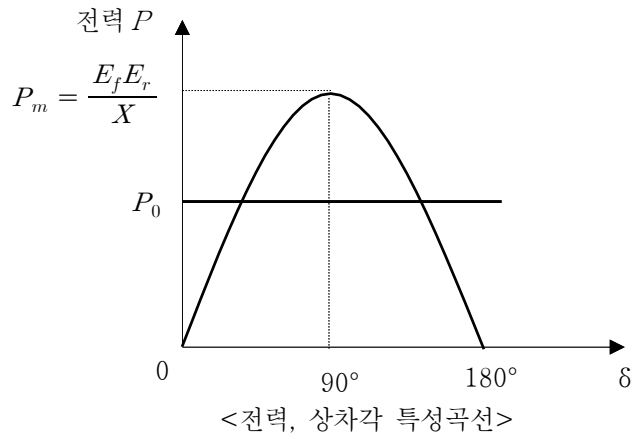
- 1) $\frac{V_r}{V_s} \geq 0.95$ 로 중거리 선로에 적용한다.(약 250km 이하에서 적용)
- 2) 상차각이 30° ~ 35° 일 때 실제 송전용량의 한계는 전압강하가 5% 이하일 때를 전압강하 한계 송전용량으로 보고 있다.

4. 정상상태 안정도 한계(steady-state stability limit)

- 1) 장거리 송전선로에서 적용된다.
- 2) 동기발전기의 동기 유지능력 한계를 말한다.
- 3) 일반적으로 단거리 선로의 전류는 부하에 의해 그 값이 결정되지만, 중, 장거리선로에서는 선로의 직렬리액턴스가 저항보다 4 ~ 10배 정도 크기 때문에 선로리액턴스에 의한 전송능력이 제약된다.
- 4) 송, 수전단 전압이 V_s , V_r , 선로리액턴스가 X, 상차각이 δ 인 경우 송전선로에 수송되는 전력 P는

$$P = \frac{V_s V_r \sin \delta}{X} \text{로 된다.}$$

- 5) 전력, 상차각 특성을 나타내는 곡선을 그리면 아래와 같다.



- 6) 위상차 δ 가 90° 에 이르면 수송전력 P 는 최대가 되는데 이때의 전력을 정태안정극한전력이라고 한다.
- 7) 리액턴스가 큰 송전선로는 이 정태안정극한전력에 의해 송전용량이 결정된다.

1-10 3상 송전선로의 영상, 정상, 역상 리액턴스를 구하는 방법을 설명하시오.

답)

1. 3상 송전선로의 리액턴스

- 1) 평상시 송전선로에는 대칭 3상인 교류가 흐르므로 정상, 영상, 역상 전류가 흘러야만 나타나는 정상, 영상, 역상 임피던스는 존재하지 않게 되고 Z_a , Z_b , Z_c 인 선로임피던스만이 존재하게 된다.
- 2) 사고가 발생하면 사고의 종류에 따라 3상 단락고장은 선로임피던스를 이용하여 계산이 가능하지만, 불평형 고장은 선로임피던스를 이용하여 계산이 안 되므로 대칭좌표법으로 해석해야 한다.
- 3) 대칭좌표법으로 불평형 고장을 해석할 때, 정상, 영상, 역상 임피던스를 알아야만 계산이 가능한데 영상, 정상, 역상 임피던스는 대칭분 회로를 구성함으로써 구할 수 있다.

2. 3상 송전선로의 정상 리액턴스를 구하는 방법

- 1) 3상 송전선로의 정상 리액턴스는 정상회로를 구성해서 구할 수 있다.
- 2) 정상회로란 사고 점에 대칭 3상 교류를 흘려주었을 때 정상전류가 흘러가는 범위를 말한다.
- 3) 송전선로의 정상 리액턴스는 작용인덕턴스와 작용정전용량을 이용하여 구할 수 있으며 한상당의 값으로 표시된다. 2회선 일 때는 2상 이론을 이용하여 구한다.
- 4) 중성점의 접지 임피던스와 무관하며 선로의 길이에 따라 값이 달라지므로 km당으로 주어지면 km를 곱해 줌으로서 구할 수 있다.
- 5) 사고 나기 전 상태의 값이 일반적으로 정상 값으로 보므로 아무 값도 주어지지 않으면 사고 나기 전 값을 적용한다.

3. 3상 송전선로의 역상 리액턴스를 구하는 방법

- 1) 3상 송전선로의 역상 리액턴스는 역상회로를 구성해서 구할 수 있다.
- 2) 역상회로란 사고 점에 상회전 방향이 반대인 대칭 3상 교류를 흘려주었을 때 역상전류가 흘러가는 범위를 말한다.
- 3) 값이 주어지지 않을 때는 일방적으로 정상 리액턴스와 같다.

4. 3상 송전선로의 영상 리액턴스를 구하는 방법

- 1) 3상 송전선로의 영상 리액턴스는 영상회로를 구성해서 구할 수 있다.
- 2) 영상 회로란 사고점에 크기와 위상이 같은 단상전원 영상전압을 가했을 때 영상전류가 흘러가는 범위를 말한다.
- 3) 송전선로의 영상리액턴스는 대지귀로인덕턴스와 대지정전용량을 이용하여 구할 수 있으며 한상당의 값으로 표시된다. 2회선 일 때는 2상 이론을 이용하여 구한다.
- 4) 중성점이 비접지면 개방회로가 되어 송전선에 영상전류가 흐르지 않으므로 송전선로의 영상임피던스는 존재하지 않는다. 한쪽만 접지되어 있으면 접지되어있는 곳만 적용한다.
- 5) 값이 주어지지 않으면 일반적으로 1회선선로에서는 작용 리액턴스에 4배, 2회선에서는 작용 리액턴스에 7배를 적용한다.

1-11 부하의 역률을 개선하면 a) 전력 (유효전력, 무효전력 등), b) 송전전류, c) 임피던스의 관점에서 어떤 점이 달라지는지 설명하시오.

답)

1. 부하 역률의 개선

- 1) 부하의 역률을 개선하는 것은 부하의 종류에 따라 달라진다.
- 2) 부하가 유도성 부하일 때
 - (1) 부하가 유도성일 때는 일반적으로 무효전력 공급원을 이용하여 무효전력을 공급함으로써 역률을 개선시킬 수 있다.
 - (2) 대표적으로 콘덴서를 사용하며, 동기조상기, SVC, STATCON 등을 사용하여 개선시킬 수 있다.
- 3) 부하가 용량성 부하일 때
 - (1) 부하가 용량성일 때는 일반적으로 무효전력 소비원을 이용하여 무효전력을 소비함으로써 역률을 개선시킬 수 있다.
 - (2) 대표적으로 병렬리액터를 사용하며, 동기조상기, SVC, STATCON 등을 사용하여 개선시킬 수 있다.

2. 부하역률 개선 시 전력의 변화

- 1) 유효전력
유효전력은 변화가 없다.
- 2) 무효전력
무효전력은 부하가 유도성일 때는 무효전력 공급으로 인해 개선 전에 비해 무효전력이 증가한다.
부하가 용량성일 때는 무효전력 소비로 인해 개선 전에 비해 무효전력이 감소한다.

3. 부하역률 개선 시 송전전류의 변화

- 1) 전류 $I = \frac{P_r}{\sqrt{3} V_r \cos\theta}$ 로 역률과 반비례하므로 부하의 종류와 관계없이 감소한다.
- 2) 유도성 부하일 때는 지상전류가 감소하고, 용량성 부하일 때는 진상전류가 감소한다.

4. 부하역률 개선 시 임피던스의 변화

병렬 콘덴서 등은 리액턴스 값이 매우 크므로 부하임피던스와 병렬로 연결하면 임피던스의 변화가 거의 없다.

1-12 가공송전선로의 미풍진동 현상의 발생원인, 문제점 및 방지대책에 대하여 설명하시오.

답)

1. 가공송전선로의 미풍진동 현상의 발생원인

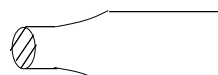
- 1) 매초 수 [m]정도의 미풍이 전선과 직각에 가까운 방향으로 불 때, 그 전선의 배후에 공기의 소용돌이가 생기고 이로 인해 전선의 수직 방향에 교번력이 작용해서 전선은 상하로 진동하게 된다.
- 2) 그 풍압에 의한 진동수가 전선의 고유진동수와 같게 되면 공진을 일으켜 진동을 지속하게 된다.
- 3) 공진현상 발생 조건
 - (1) 전선의 중량이 가벼울 때 (2) 전선의 경간이 장경간일 때
 - (3) 전선의 가선 장력이 클 경우 (4) 전선의 바깥지름이 클 경우

2. 가공송전선로의 미풍진동 현상의 문제점

- 1) 진동을 지속하게 되면 전선의 지점에 피로가 누적되어 결국에는 단선사고를 일으키게 된다.
- 2) 진동에 의한 단선사고 시 전선의 단면



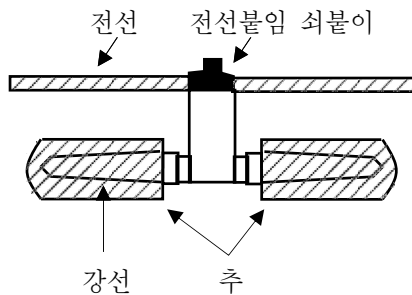
< 진동에 의한 단선 >



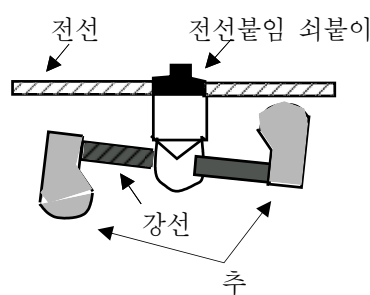
< 장력에 의한 단선 >

3. 가공송전선로의 미풍진동 현상의 방지대책

- 1) 지지점에 가까운 곳에 추(스톡브리지 댐퍼, 토셔널 댐퍼)를 달아서 진동을 감소시키는 방법

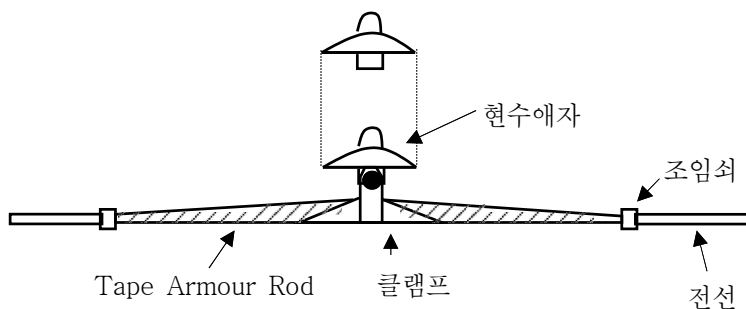


< 스톡브리지 댐퍼 >



< 토셔널 댐퍼 >

- 2) 지지점 부근의 전선을 보강하는 아머로드 등이 있다.



< 아머 로드 >

1-13 발전기의 전력(P_G)-주파수(f) 특성과 부하의 전력(P_L) 주파수(f) 특성에 대하여 설명하시오.

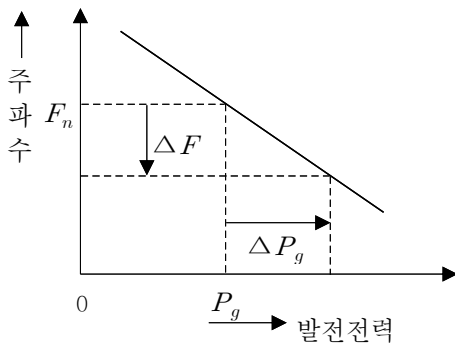
답)

1. 발전기의 전력(P_G)-주파수(f) 특성

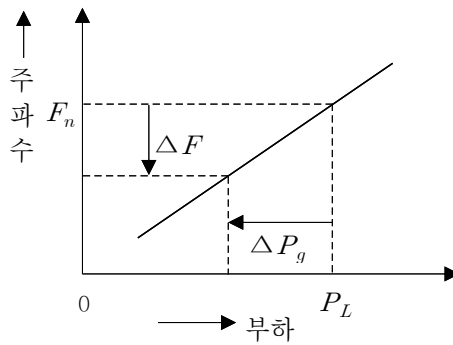
1) 정의

전력변화와 주파수 변화와의 관계, 즉 전력이 변화하면 주파수가 어떻게 변하는가 하는 것을 전력·주파수 특성이라 한다.

2) 전력 계통의 전력 · 주파수 특성 곡선



< 발전기 주파수 특성 >



< 부하의 주파수 특성 >

3) 발전전력 · 주파수 특성 (G,F 운전)

(1) 조속기에 의해 발전기 회전수가 증가하면 발전기 출력을 감소시키고 발전기 회전수가 감소하면 발전기 출력을 증가시킨다.

(2) 관계식

$$K_G = -\frac{\Delta P_G}{\Delta F} [MW/Hz]$$

2. 부하의 전력(P_L)주파수(f) 특성

1) 정의

주파수가 상승하면 소비전력은 증가하고, 주파수가 저하하면 소비전력이 감소해서 주파수의 변동을 억제하려는 성질을 부하의 자기 제어성이라 한다.

2) 관계식

$$K_L = \frac{\Delta P_L}{\Delta F} [MW/Hz]$$

3. 전력 계통의 전력 · 주파수 특성정수

1) 정의

발전 · 전력 주파수 특성정수와 부하전력 · 주파수 특성정수를 합하여 전력 계통의 전력 · 주파수 특성정수라 한다.

2) 관계식

$$K = K_G + K_L [MW/Hz], \quad K_G = \sum_{i=1}^n K_{gi} \text{ 이므로 } K = K_L + \sum_{i=1}^n K_{gi}$$

4. 전력계통 특성정수의 성질

- 1) 조속기 운전을 하는 발전기 대수가 많을수록, 속도조정률이 작을수록 K_G 는 커진다.
- 2) 계통 내에 회전기 부하가 많을수록 K_L 은 커진다.
- 3) 심야보다는 주간, 휴일보다는 평일 쪽이 발전기 병렬 대수가 많기 때문에 계통 특성 정수 K 는 커진다.



제 2교시 문제풀이

2-1. 전력계통의 무효전력 발생원과 소비원을 열거하고, 무효전력의 과부족 시 문제점과 대책에 대하여 설명하시오.

답)

1. 전력계통의 무효전력 발생원과 소비원 열거

- 1) 발생원이란 지상무효전력을 공급하는 것으로 실질적으로는 진상무효전력을 소비하는 것을 말한다.
- 2) 소비원이란 진상무효전력을 공급하는 것으로 실질적으로는 지상무효전력을 소비하는 것을 말한다.
- 3) 무효전력 발생원과 소비원 열거표

지상무효전력 공급 = 진상무효전력 소비 무효전력 공급원 = 전압이 상승한다.	지상무효전력 소비 = 진상무효전력 공급 무효전력 소비원 = 전압이 저하한다.
발전기 과여자 운전 - 중부하 시 과여자로 여자전류를 증가시켜 무효전력을 공급한다. 별도의 조상설비가 필요 없으므로 경제적이다.	발전기 저여자운전 - 경부하 시 부족여자로 여자전류를 감소시켜 계통 무효전력을 흡수한다. 진상영역이 작으므로 안정도문제, 고정자 단부과열, 소내동력 저하 등의 문제점이 발생한다.
동기조상기 과여자운전 - 무부하로 운전하면서 직류의 계자회로의 저항을 가감함으로써 전기자에 흐르는 전류의 위상을 90° 앞서게 하여 무효전력을 공급한다. 연속제어로 속응성이 좋으나 회전기이므로 가격이 비싸고 유지 관리 비용이 많이 든다.	동기조상기 저여자운전 - 무부하로 운전하면서 직류의 계자회로의 저항을 가감함으로써 전기자에 흐르는 전류의 위상을 90° 뒤지게 하여 무효전력을 소비한다.
전력용 콘덴서 - 중부하 시 군단위의 뱅크용량으로 투입되어 무효전력 공급원으로만 작용. 가격이 저렴하나 계단제어로 속응성이 떨어지고 무효전력 소비는 할 수 없다.	분로 리액터 - 경부하시 무효전력 소비원으로만 투입되어 페란티 현상, 발전기 자기여자현상 등을 방지. 리액터 가격이 비싸고 무효전력 공급은 할 수 없다.
ULTC, NLTC, LRC, LRT 등 탭 절환기를 이용하여 전압을 상승시켜 무효전력을 공급한다.	ULTC, NLTC, LRC, LRT 등 탭절환기를 이용하여 전압을 저하시켜 무효전력을 소비한다.
SVC, STATCON 등 전력용반도체 소자를 이용하여 진상전류를 취하여 연속적으로 무효전력을 공급한다. 연속성, 속응성이 우수하나 전력변환기의 가격이 비싸.	SVC, STATCON 등 전력용반도체 소자를 이용하여 지상전류를 취하여 연속적으로 무효전력을 소비한다.

2. 무효전력의 과부족 시 문제점과 대책

1) 무효전력 부족 시 문제점

- (1) 유효전력 손실이 증가한다.

$$P_{\ell} = P_s - P_r = 3I^2 R = \frac{P_r^2 R}{V_r^2 \cos^2 \theta} \propto \frac{1}{V_r^2}, \quad I = \frac{P_r}{\sqrt{3} V_r \cos \theta}$$

위 식에서 손실은 전압의 제곱에 반비례하여 증가한다.

- (2) 송, 변전 설비의 전류용량에 의한 송전용량의 저하

$$P_c = V_s I_{\max} \cos \theta$$

위 식에서 설비에 공급되는 전류가 일정할 때 전압이 저하하면 송전용량도 저하한다.

- (3) 정태안정도에 의한 송전용량의 저하

$$P = \frac{V_s V_r}{X} \sin \delta$$

위 정태안정도 식에서 전압이 저하하면 안정도는 나빠지고 송전용량도 저하한다.

- (4) 발전소 출력의 저하

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta$$

위 화력발전소 출력식에서 전압이 저하하면 출력이 저하한다.

전력계통의 전압이 저하하면 발전소 보조기기 등의 출력도 저하해서 발전기 출력이 저하한다.

2) 무효전력 부족 시 대책

무효전력 공급원을 설치한다.

- (1) 발전기 과여자 운전

여자전류를 증가시켜 과여자하여 지상무효전력을 공급한다.

- (2) 동기조상기 과여자운전

계통의 전압이 낮으면 과여자로 운전하여 직류의 계자회로의 저항을 감함으로써 전기자에 흐르는 전류의 위상을 90° 앞서게 하여 진상전류를 흡수하여 지상 무효전력을 공급하여 전압을 높인다.

- (3) 콘덴서 설치

진상전류를 취하여 전압을 상승시켜 지상무효전력을 공급한다. 계단적으로 공급하여 속응성이 떨어진다.

- (4) SVC

전력용반도체 소자를 이용하여 계통의 전압과 기준전압을 비교하여 계통전압이 낮으면 진상전류를 취하여 전압을 상승시켜 지상무효전력을 공급한다. 속응성이 좋고 연속제어가 가능하다.

- (5) STATCON

전력용반도체 소자를 이용하여 계통의 전압과 기준전압을 비교하여 계통전압이 낮으면 진상전류를 취하여 전압을 상승시켜 지상무효전력을 공급한다. 속응성이 좋고 연속제어가 가능하다.

- (6) ULTC, NLTC, LRC, LRT 등 탭절환기를 이용하여 전압을 상승시켜 지상무효전력을 공급한다.

3) 무효전력 공급 과잉 시 문제점

(1) 전력용 기기의 열화 촉진

전압이 높으면 절연물의 열화와 성능 저하가 촉진되어 고장 발생의 원인이 된다.

(2) 고조파의 발생

변압기나 분포리액터 등의 철심을 사용한 전력용 기기의 단자전압이 이상상승하면 전압파형이 왜파로 되고 철심포화에 의한 제3고조파 등이 발생한다.

(3) 전력기기의 수명의 저하

수명은 전압의 1.6승에 반비례하므로 감소하므로 전압이 10% 상승할 때 수명은 50% 감소한다.

4) 무효전력 과잉 시 대책

무효전력 소비원을 설치한다.

(1) 발전기 저여자 운전

여자전류를 감소시켜 저여자하여 지상무효전력을 소비한다.

(2) 동기조상기 저여자운전

계통의 전압이 높으면 저여자로 운전하여 직류의 계자회로의 저항을 가함으로써 전기자에 흐르는 전류의 위상을 90° 뒤지게 하여 지상전류를 흡수하여 지상 무효전력을 소비하여 전압을 낮춘다.

(3) 병렬 리액터 설치

지상전류를 취하여 전압을 낮추어 지상무효전력을 소비한다.

(4) SVC

전력용반도체 소자를 이용하여 계통의 전압과 기준전압을 비교하여 계통전압이 높으면 지상전류를 취하여 전압을 낮추어 지상무효전력을 소비한다.

(5) STATCON

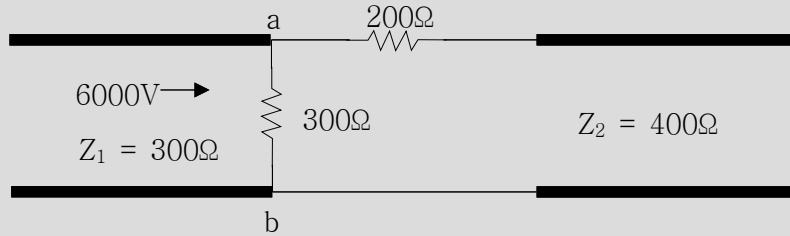
전력용반도체 소자를 이용하여 계통의 전압과 기준전압을 비교하여 계통전압이 높으면 지상전류를 취하여 전압을 낮추어 지상무효전력을 소비한다.

(6) ULTC, NLTC, LRC, LRT 등 탭절환기를 이용하여 전압을 낮추어 지상무효전력을 소비한다.

2-2. 특성 임피던스가 각각 $Z_1 = 300\Omega$, $Z_2 = 400\Omega$ 인 두 개의 케이블이 그림과 같이 연결되어 있고, 6600V의 직류전압 신호가 좌측 케이블을 통하여 우측으로 전송되고 있다. 다음 물음에 답하시오.

(a) 케이블 지점 ab에서 좌측으로 반사되는 전압 V_1 을 구하시오.

(b) 케이블 지점 ab에서 우측 케이블로 전달되는 전압 V_2 을 구하시오.



답)

2-3. 수차의 비속도(N_s)를 설명하고, 수차(펠톤, 프란시스, 프로펠러, 카플란, 사류수차)별 비속도의 한계값과 비속도 측면에서 본 각 수차의 특성을 설명하시오.

답)

1. 수차의 비속도(N_s)를 설명

1) 정의

특유속도란 어떤 러너와 기하학적으로 닮은 러너를 가상하여 이것을 단위낙차 1[m]의 위치에서 단위출력 1[kw]를 발생시키기 위한 1분당 필요 회전수를 말한다.

$$\text{즉, } N_s = N * \left(\frac{P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} \right) [m \cdot kw]$$

2) 비속도 식 유도

2개의 닮은꼴 러너의 설계유량을 각각 Q_1, Q_2 [m^3/s], 러너의 지름을 D_1, D_2 [m], 낙차를 H_1, H_2 [m]라 하면

(1) 러너의 주변속도 ($v = \sqrt{2gH}$)

$$V_1 = K_1 \sqrt{2gH_1} = K_1 H_1^{\frac{1}{2}} \quad V_2 = K_1 \sqrt{2gH_2} = K_2 H_2^{\frac{1}{2}}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(2) 유량 ($Q = VA = V * \frac{\pi D^2}{4}$) $K_3 = \frac{\pi}{4}$

$$Q_1 = K_3 V_1 D_1^2 \quad Q_2 = K_3 V_2 D_2^2 \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

(3) 출력 ($P = 9.8QH$) $K_4 = 9.8$

$$P_1 = K_4 H_1 Q_1, \quad P_2 = K_4 H_2 Q_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{Q_1}{Q_2} \left(\frac{H_1}{H_2} \right) = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \left(\frac{H_1}{H_2} \right) = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \quad \frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(4) 회전수 [$V = \pi DN, N = \frac{1}{\pi} \frac{V}{D}$] $K_5 = \frac{1}{\pi}$

$$N_1 = K_5 V_1/D_1, \quad N_2 = K_5 V_2/D_2$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{K_5 \frac{V_1}{D_1}}{K_5 \frac{V_2}{D_2}} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \left(\frac{D_2}{D_1} \right) = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{3}{4}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{\frac{5}{4}} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(5) $H_2 = 1[m]$, $P_2 = 1[kw]$ 라고 하면, 특유속도 정의에 의해 $N_2 = N_s$ 로 되기 때문에

$$\frac{N}{N_s} = (H)^{\frac{5}{4}} \left(\frac{1}{P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \therefore N_s = N \frac{P^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{5}{4}}} [m \cdot Kw]$$

3) 유효낙차와 특유속도와의 관계

(1) 저낙차 발전소

유수의 속도가 낮으므로 N_s 가 큰 형식의 수차를 선정하지 않으면 회전수 N 이 작아져서 수차 및 발전기가 다 같이 대형화되어 경제성이 나빠진다.

(2) 고낙차 발전소

유수의 속도가 커서 N_s 가 작은 형식의 수차라도 경제적으로 큰 영향이 없으므로 효율이 높고 견고한 구조의 펄슨수차를 선정 하는 것이 좋다.

2. 수차별 비속도의 한계 값

종 류		Ns의 한계값	
펠톤 수차		$12 \leq N_s \leq 23 [m]$	
프란시스 수 차	저속도형	$N_s \leq \frac{20,000}{H+20} + 30$	65 ~ 150 [m]
	중속도형		150 ~ 250 [m]
	고속도형		250 ~ 350 [m]
사 류 수 차		$N_s \leq \frac{20,000}{H+20} + 40$	150 ~ 250 [m]
카플란 수차 프로펠러 수차		$N_s \leq \frac{20,000}{H+20} + 50$	350 ~ 800 [m]

3. 비속도 측면에서 본 각 수차의 특성

1) 펄슨 수차

- (1) 특유속도가 낮아 고낙차 지점에 적합하다.
- (2) 러너 주변이 물에 대한 압력이 없어 누수의 염려가 없다.
- (3) 마모 부분의 교체가 용이하다.
- (4) 니들밸브의 유량조정으로 출력변화에 대한 효율 저하가 적어 변동부하에 적합하다.
- (5) 노즐 사용 개수를 조절하여 고효율 운전이 가능하다.

2) 프란시스 수차

- (1) 적용 낙차 범위가 넓고 구조가 간단하며 가격이 저렴하다.
- (2) 고낙차 영역에서 펄슨 수차에 비해 고속 소형으로 경제적이다.

$(N = N_s \frac{H^{\frac{5}{4}}}{P^{\frac{1}{2}}} = N_s P^{-\frac{1}{2}} H^{\frac{5}{4}})$ 에서 P 와 H 가 같으면 프란시스 수차의 N_s 가 펄슨 수차의 N_s 보다 크기 때문에 속도 N 을 크게 할 수 있다)

- (3) 러너의 날개가 고정식이므로 부하변동 시에는 안내날개를 조정하여 러너에 유입되는 물의 방향을 변화시킴으로 경부하시에는 효율저하가 크다. 따라서 경부하시에는 효율이 우수한 경부하 러너로 교체한다.

3) 프로펠러 수차

- (1) 비속도가 높아 저낙차 지점에 적합하다.
- (2) 날개를 분해할 수 있어서 제작, 수송, 조립 등이 편리하다.
- (3) 고정 날개형은 구조가 간편해서 가격도 싸다.

4) 카플란 수차

- (1) 비속도가 높아 저낙차 지점에 적합하다.
- (2) 날개를 분해할 수 있어서 제작, 수송, 조립 등이 편리하다.
- (3) 낙차, 부하의 변동에 대하여 효율저하가 적다.

5) 사류 수차

- (1) 프란시스 수차의 저낙차 범위에 사용하면 효율이 높다.
- (2) 효율 특성이 평탄해서 낙차, 부하의 변동에 유리하다.

2-4. 3상 평형회로의 각 상의 선로 임피던스가 Z_L , 각 상의 부하 임피던스(Y결선)가 Z 이다. 3상 전원 V_a, V_b, V_c 에 불평형 전압이 나타날 때 다음 경우에서 a상 선로에 흐르는 선전류 I_a 를 구하시오.

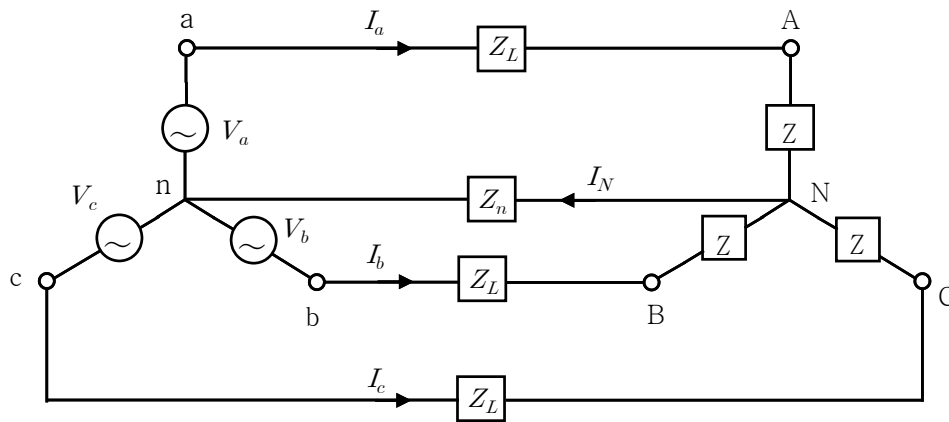
(단, 전원측과 부하측은 Y결선이다)

- a) 중성점이 접지되어 있고, 접지 임피던스가 Z_n 인 경우
c) 중성점이 비접지인 경우

답)

1. 중성점이 접지되어 있고 접지임피던스가 Z_n 인 경우 I_a

1) 회로도



2) 중성점 잔류 전압은 V_N 이고, 양단 중성점이 Z_n 으로 접지되어 있으므로 중성선이 있는 것과 같이 계산한다.

3) n을 기준인 영전위라 가정했을 때 중성점 N에서의 전위차를 V_N 이라 하자.

4) 각 선에 흐르는 전류 계산

$$I_a = \frac{V_a - V_N}{Z + Z_L} = (V_a - V_N)Y, \text{ 여기서 } Y = \frac{1}{Z + Z_L}$$

$$I_b = \frac{V_b - V_N}{Z + Z_L} = (V_b - V_N)Y, \quad I_c = \frac{V_c - V_N}{Z + Z_L} = (V_c - V_N)Y$$

$$I_N = \frac{V_N}{Z_n} = V_N Y_n$$

5) 키르호호프 전류법칙을 적용하면

$$I_a + I_b + I_c = I_N$$

$$(V_a - V_N)Y + (V_b - V_N)Y + (V_c - V_N)Y = V_N Y_n$$

6) 중성점 잔류전압 V_N

$$V_N = \frac{Y(V_a + V_b + V_c)}{3Y + Y_n} = \frac{Z_n(V_a + V_b + V_c)}{3Z_n + Z + Z_L}$$

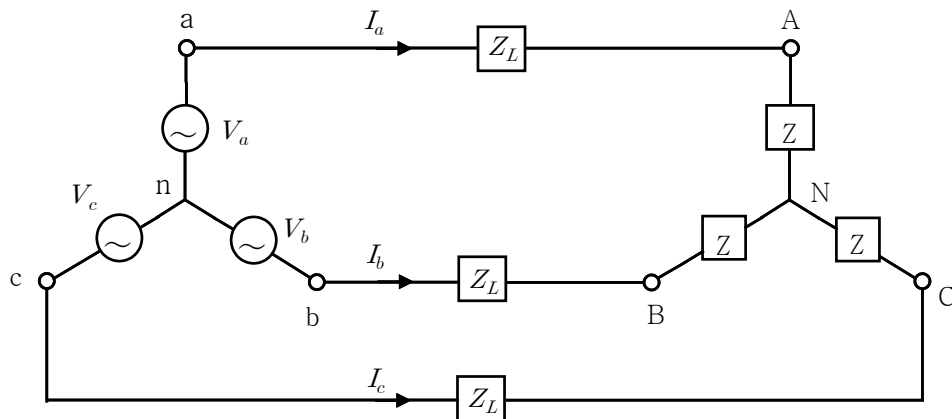
7) a 선에 흐르는 전류 I_a

$$I_a = (V_a - V_N)Y = \left(V_a - \frac{Z_n}{3Z_n + Z + Z_L}(V_a + V_b + V_c) \right) \times \frac{1}{Z + Z_L}$$

$$= \left(\frac{2Z_n + Z + Z_L}{3Z_n + Z + Z_L} V_a - \frac{Z_n}{3Z_n + Z + Z_L}(V_b + V_c) \right) \times \frac{1}{Z + Z_L}$$

2. 중성점이 비접지인 경우 I_a

1) 회로도



2) 비접지인 경우는 접지인 경우의 $Z_n = \infty$ ($Y_n = 0$), $I_N = 0$ 인 경우와 같으므로 이 조건을 접지인 경우에 대입하여 구할 수 있다.

3) 각 선에 흐르는 전류 계산

$$I_a = \frac{V_a - V_N}{Z + Z_L} = (V_a - V_N)Y, \text{ 여기서 } Y = \frac{1}{Z + Z_L}$$

$$I_b = \frac{V_b - V_N}{Z + Z_L} = (V_b - V_N)Y, \quad I_c = \frac{V_c - V_N}{Z + Z_L} = (V_c - V_N)Y$$

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$(V_a - V_N)Y + (V_b - V_N)Y + (V_c - V_N)Y = 0$$

4) 중성점 잔류전압 V_N

$$V_N = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$$

5) a 선에 흐르는 전류 I_a

$$I_a = (V_a - V_N)Y = \left(V_a - \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \right) \times \frac{1}{Z + Z_L}$$

$$= \frac{2}{3(Z + Z_L)} V_a - \frac{1}{3(Z + Z_L)}(V_b + V_c)$$

2-5. 전력계통에서 경제급전(economic load dispatch), 안전도제약 경제급전(security constrained economic load dispatch), 최적조류계산(optimal power flow)의 (a) 목적 (b) 필요성, (c) 계산방법을 비교 설명하시오.

답)

1. 경제 급전

1) 정의

경제급전(ED) 기능은 계통수요에 따라 가장 경제적으로 전력을 생산, 공급하기 위해 각기 다른 발전기 특성을 고려하여 전체 연료비가 최소가 되도록 발전기별 최적출력(유효전력)을 계산 자동발전제어(AGC) 기능에 제공하는 기술

2) 기능

- (1) 경제급전은 수력, 화력, 원자력 등의 다양한 발전방식과 사용연료가 서로 다른 발전기를 조합하여 실시간으로 변동하는 전력수요에 맞추어 발전기출력을 경제적으로 배분하여 전체 발전연료비를 최소화하는 것이다.
- (2) 경제부하배분은 매 1분 주기로 경제급전을 실행하며, 경제급전을 실행 중인 발전기를 대상으로 경제배분을 한다.
- (3) 급전 원 입력모드의 발전기는 입력된 기준출력(Base MW), 수동모드의 발전기는 현재 출력을 배분 값으로 자동설정하고 경제배분에서 제외하며, 계통부하의 급격한 변동, 발전기 운전모드 등의 변경 및 발전기 특성 데이터의 수정이 있을 경우 자동으로 재실행한다.

3) 과정

- (1) ED의 기능은 최적 계통운용을 위하여 발전기의 출력을 재 배분하는 것이다.
- (2) ED는 각 발전기의 비선형 연료비 함수, 송전망의 제약, 상태추정 프로그램이 추정한 전력 계통의 각 지점의 전압 및 위상, 차단기 상태, 발전기 출력 등의 정보를 이용하여 최적조류계산(OPF, optimal power flow)을 실행한다.
- (3) 이에 따라 각 발전기의 출력이 계산되면 현재 상태로부터의 변화량을 각 발전기에 보내어 조속기의 출력 기준점을 변화시키도록 한다.
- (4) OPF의 계산결과는 상정사고를 고려하여 다시 수정된다.
- (5) 다시 말하면 상정사고가 발생한 상태에서도 발전기가 운전을 계속하여 안전성을 유지할 수 있도록 출력을 배분한다.

2. 최적조류계산

1) 정의

운영자가 정의하는 계통모델, 제어요소, 목적함수, 제약요소를 기반으로 전력계통을 해석하여 계통운영 한계값의 위반을 제거하거나 최소화하고 전력계통의 안정성을 향상시키며 유효전력 손실 최소화, 연료비용 최소화 및 다른 비용함수를 최소화하는 해를 생성하고 계통운영상의 주요 제어 및 비용권고 사항 등을 제시하는 기능으로 해의 정확성을 위해 비선형계획법을 적용하였다.

2) 방법

- (1) 경제급전을 위하여 초기에는 Lambda Iteration Method, Gradient Method, Newton's Method 등이 사용되었으나 수렴속도, 송전선로 용량제약의 취급, 부등호 제약조건의 처리, 안전도 제약조건의 처리 등의 문제점으로 인하여 사용이 확대되지 않았다,
- (2) OPF 프로그램은 1961년 개발된 이래 계속 수정, 보완되어 현재에 이르고 있으며 위의 3가지 방법의 경제급전기능을 대체하였다.
- (3) OPF는 송전선로의 용량 제약 등의 부등호 제약조건이 있는 경우에 적용하기에 알맞고 현재에는 선형계획법 최적조류계산(LPOPF), Interior Point Method OPF 등이 많이 이용된다.
- (4) OPF에 적용되는 제약조건은 발전기 출력, 선로의 유효전력 및 무효전력, 전압, 안전도 등에 관련한 각종 운용상의 제약이며, OPF가 조정할 수 있는 변수는 발전기의 출력과 전압, 변압기의 탭(tap) 조정값, 무효전력보상장치의 값 등이다.
- (5) 무효전력의 조정은 지역적으로도 가능하며 무효전력의 변화가 비용에 미치는 영향은 유효전력의 그것에 비하여 미미하기 때문에 발전기의 출력처럼 중앙에서 제어하지 않고 비용최소화 기능과 분리하여 지역적으로 제어한다. OPF는 경쟁전력시장에서 모선 별 한계가격을 계산하는 데에도 사용된다.

3. 안전제약경제급전

1) 정의

상태추정 결과로부터 발전기 및 송전망 데이터를 수신하여 전력계통의 안전도 제약조건(송전 제약, 발전기 운전제약 및 예비력 제약)을 고려하여 급전대상 발전기에 대한 경제급전 상, 하한값을 계산하여 경제급전(ED) 기능에 제공하는 기능이다.

2-6. 발전용 보일러의 종류 및 표준 석탄화력에 주로 쓰이는 관류형 보일러 방식의 원리, 구성 및 장단점에 대하여 설명하시오.

답)

1. 발전용 보일러의 종류

1) 보일러의 정의

연료를 연소시켜 그 열을 복사, 전도, 대류로 수관내의 물에 전달하여 규정된 압력과 온도의 증기를 만들어 내는 장치이다.

2) 발전용 보일러의 종류

(1) 급수 순환방식에 따른 분류

① 자연순환식 보일러

급수와 기수 혼합물의 밀도(비중)차를 이용하여 순환력을 얻는 보일러로 사용 압력은 $150 \sim 170[\text{kg}/\text{cm}^2]$ 이하이며 압력이 높아지면 충분한 순환력 확보가 안 되므로 드럼 높이가 높아 보일러가 대형화되어 가격이 비싸지고 유량 분포도 고르지 않다.

② 강제순환식 보일러

보일러수의 순환회로의 도중에 관수 순환펌프를 설치해서 강제적으로 물을 순환시켜서 순환력을 얻는 보일러로 강제 순환에 의해 유량 분포가 고르고 보일러 기정, 정지가 빠른 반면, 유지 관리 비용이 증대한다.

③ 관류식 보일러

벤슨 보일러, 슬처 보일러 등이 사용된다.

④ 복합순환식 보일러

부하가 30% 이상 시에는 강제 관류식을 채택하고 30%이하 저부하시에는 강제 순환식으로 운전하는 보일러로 저부하시 효율 저하가 적으므로 효율이 좋은 반면, 운전제어가 복잡하고 유지관리 비용이 증대된다.

(2) 사용 연료에 따른 분류

① 석탄연소 보일러

석탄을 연소하여 증기를 발생시키는 보일러로 미분탄 연소 보일러와 유동층 연소 보일러 등이 이에 속한다. 석탄을 연소하므로 환경장해가 발생하므로 환경대책을 충분히 세워야 한다.

② 중유연소 보일러

중유를 버너로 분사하여 연소하는 보일러로 석유를 사용하므로 환경장해가 발생하고 원유 가격의 변동에 영향을 받는 반면, 연소장치가 간단하고, 열효율이 높고, 속응성이 좋으며, 석탄에 비해 발열량이 약 2배 정도로 높아 회차리가 간단하다.

③ 석탄+중유 혼합 보일러

석탄과 중유를 혼합하여 연소하는 보일러

④ 가스연소 보일러

가스를 연소해서 증기를 발생하는 보일러로 가스사용으로 환경장해가 작은 반면 연소범위가 좁고, 연료저장에 특수설비가 필요하다.

(3) 열의 흡수 방법에 의한 분류

① 대류형 보일러

공기를 덥혀서 열을 가지는 물이 이동하여 증기를 발생하는 보일러

② 복사형 보일러

빛의 형태의 열을 직접 이용하여 증기를 발생하는 보일러

(4) 사용 증기압에 의한 분류

① 아임계압 보일러

물의 임계압력 $225 \text{ [kg/cm}^2 \text{ abs]}$ 를 경계로 이 압력 이하에서 운전하는 보일러를 말한다.

② 초임계압 보일러

물의 임계압력 $225 \text{ [kg/cm}^2 \text{ abs]}$ 를 경계로 이 압력 이상에서 운전하는 보일러를 말한다.

2. 표준 석탄 화력에 주로 쓰이는 관류형 보일러

1) 관류형 보일러의 정의

증기 압력이 임계압력 $225.65 \text{ [kg/cm}^2]$ 이상이 되면 물과 증기가 혼합된 비등현상은 없어지고 포화수로부터 곧바로 증기가 되는데 이러한 현상을 이용한 보일러를 관류식 보일러라 한다.

2) 종류

벤슨 보일러(Benson Boiler)와 솔처 보일러(Sulzer Boiler)가 있다.

3) 표준 석탄 화력에 주로 쓰이는 관류형 보일러는 솔처 보일러(Sulzer Boiler)를 표준으로 하고 있다.

4) 솔처 보일러(Sulzer Boiler) 원리

(1) 증발관 출구에 설치된 기수분리기(Separator)가 기동 및 정지 그리고 저부하시 기수(氣水)혼합물을 분리시키며, 정상 운전 시는 보일러수가 증발관에서 모두 증기로 변하므로 기수분리의 필요성이 없다.

(2) 기수분리기 하부에 설치된 순환펌프(Circulating Pump)는 포화수를 절탄기 입구로 재순환 시킨다.

5) 솔처 보일러(Sulzer Boiler) 구성

(1) 절탄기(Economizer)

보일러 배기가스를 이용하여 급수를 가열하는 설비를 말한다.

(2) 증발관(Evaporator)

정상운전 시 보일러 수를 증기로 변환시켜 주는 관.

(3) 기수분리기(Separator)

증발관 출구에 설치되어 기동 및 정지 그리고 저부하시 기수(氣水)혼합물을 분리시킨다.

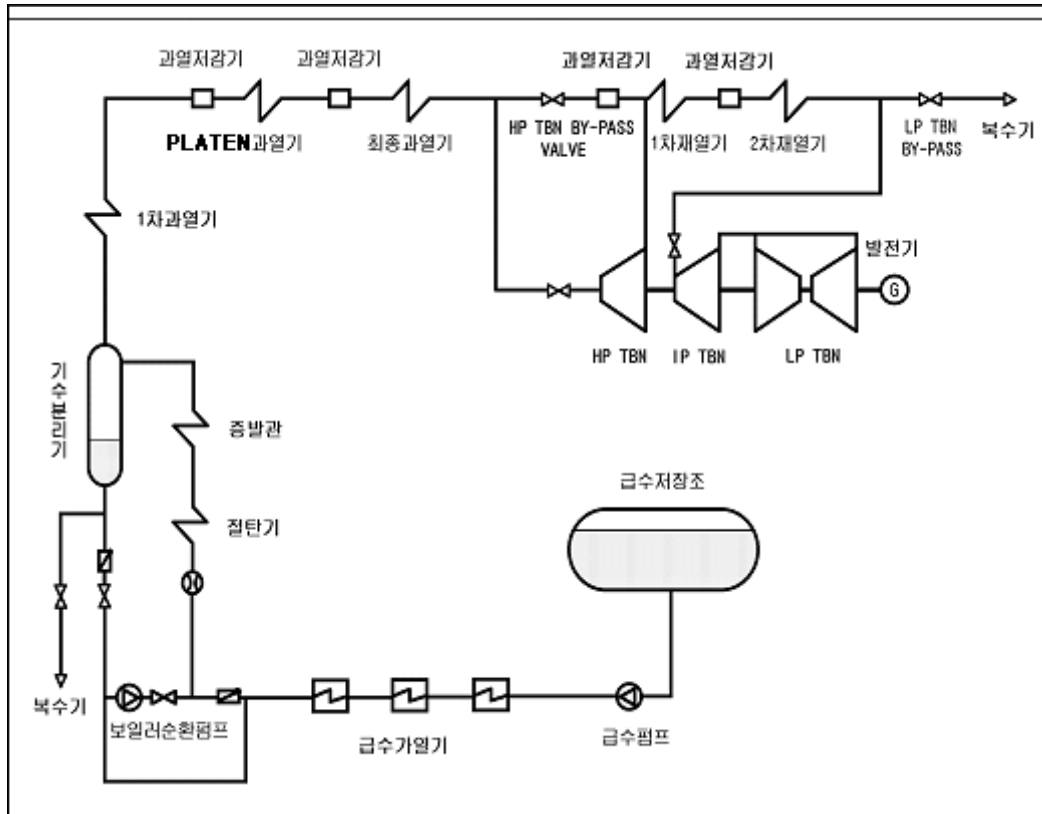
(4) 순환펌프

기수분리기 하부에 설치되어 포화수를 절탄기 입구로 재순환 시킨다.

(5) 급수가열기

추기증기를 이용하여 급수에 열을 가하는 설비.

(6) 표준석탄화력 솔처 보일러 계통도



< 표준석탄화력 솔처 보일러 계통도 >

6) 솔처 보일러(Sulzer Boiler) 장, 단점

(1) 장점

- ① 기동 시 과열기로 물이 순환되지 않으므로 열간기동(Hot Start-Up)이 가능하다.
- ② 보일러 기동시간이 단축되고 열손실이 감소된다.
- ③ 직경이 작은 튜브가 사용되므로 중량이 가볍고, 내압 강도가 크다.
- ④ 보일러 보유수량이 적어 기동시간이 빠르고 부하 추종이 양호하다.
- ⑤ 기동 시 증기가 고압터빈을 바이패스하여 재열기로 흐르므로 재열기의 과열을 방지할 수 있다.
- ⑥ 터빈 정지 시 보일러의 단독운전이 가능하다.

(2) 단점

- ① 압력손실이 증대되어 급수펌프의 동력손실이 많다.
- ② 고도의 제어기술과 각종 보호장치가 필요하다
- ③ 복수기는 터빈을 바이패스한 증기를 응축시키기 위해서 보일러 점화전 정상 상태로 운전 시켜야 한다.
- ④ 운전 중 보일러수에 포함된 고형물이나 염분 배출을 위한 블로우 다운(Blow Down)이 불가능하여 보충수량은 적으나 수질관리를 철저히 하여야 한다.



제 3교시 문제풀이

3-1. 다음은 전력 원선도에 관한 설명이다. 각각의 물음에 답하시오.

- (1) 전력 원선도 상의 P손실, Q손실을 나타내고 전력원선도로부터 파악할 수 있는 사항을 간략히 설명하시오.
- (2) 일정역률($\cos \theta$)의 부하를 증가시키는 경우에 정전압을 유지하기 위한 수전단의 조상설비 운용방법을 설명하시오.

답)

1. 전력원선도 식유도

- 1) 4단자 정수 표현식에서

$$\dot{E}_s = A\dot{E}_r + B\dot{I}_r$$

$$\dot{I}_s = C\dot{E}_r + D\dot{I}_r$$

- 2) I_s, I_r 에 대해 정리하면

$$\dot{I}_r = \frac{1}{B}\dot{E}_s - \frac{A}{B}\dot{E}_r$$

$$\dot{I}_s = C\dot{E}_r + D\left(\frac{1}{B}\dot{E}_s - \frac{A}{B}\dot{E}_r\right)$$

$$= \frac{D}{B}\dot{E}_s - \frac{AD-BC}{B}\dot{E}_r = \frac{D}{B}\dot{E}_s - \frac{1}{B}\dot{E}_r$$

- 3) 송전단 전압(E_s)은 수전단 전압(E_r)보다 위상이 θ 만큼 앞선다.

$$\dot{E}_r = E_r \angle 0^\circ, \dot{E}_s = E_s \angle \theta$$

- 4) $\dot{Z} = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2} \angle \tan^{-1} \frac{X}{R} = b \angle \beta = \dot{B}$

$$\frac{1}{B} = \frac{1}{b} \angle -\beta, \quad \frac{A}{B} = m - jn, \quad \frac{D}{B} = m' - jn', \quad \rho = \frac{E_s E_r}{b}$$

- 5) 송수전단의 전류

$$\dot{I}_s = \frac{D}{B}\dot{E}_s - \frac{1}{B}\dot{E}_r = (m' - jn')E_s \angle \theta - \frac{E_r}{b} \angle -\beta$$

$$\dot{I}_r = \frac{1}{B}\dot{E}_s - \frac{A}{B}\dot{E}_r = \frac{E_s}{b} \angle (\theta - \beta) - (m - jn)E_r$$

- 6) 송전전력 W_s

$$\begin{aligned} W_s &= P_s + jQ_s = E_s \dot{I}_s^* = E_s \angle \theta \left[(m' + jn')E_s \angle -\theta - \frac{E_r \angle \beta}{b} \right] \\ &= (m' + jn')E_s^2 - \frac{E_s E_r}{b} \angle (\theta + \beta) = (m' + jn')E_s^2 - \rho \angle (\theta + \beta) \end{aligned}$$

7) 수전전력 W_r

$$\begin{aligned}
 W_r &= P_r + jQ_r = E_r I_r^* = E_r \angle 0 \left[\frac{1}{b} (E_s \angle (\theta - \beta) - (m - jn) E_r) \right]^* \\
 &= E_r \angle 0 \left[\frac{1}{b} (E_s \angle (\beta - \theta) - (m + jn) E_r) \right] \\
 &= \frac{E_s E_r}{b} \angle (\beta - \theta) - (m + jn) E_r^2 = \rho \angle (\beta - \theta) - (m + jn) E_r^2
 \end{aligned}$$

8) 위 전력식을 변경하면

$$(P_s - m' E_s^2) + j(Q_s - n' E_s^2) = -\rho \angle (\theta + \beta)$$

$$(P_r + m E_r^2) + j(Q_r + n E_r^2) = \rho \angle (\beta - \theta)$$

9) 양변을 제곱하면

$$(P_s - m' E_s^2)^2 + (Q_s - n' E_s^2)^2 = \rho^2$$

$$(P_r + m E_r^2)^2 + (Q_r + n E_r^2)^2 = \rho^2$$

송전단은 중심이 $(m' E_s^2, n' E_s^2)$ 반지름은 $\rho = \frac{E_s E_r}{b}$ 인 원이 된다.

수전단은 중심이 $(m E_r^2, n E_r^2)$ 반지름은 $\rho = \frac{E_s E_r}{b}$ 인 원이 된다.

2. P손실, Q손실 표시 및 전력원선도로부터 알 수 있는 사항

전력원선도는 $P_s, Q_s, P_r, Q_r, \theta$ 5개 인자 중 1가지만 알면 나머지가 정해지므로 송수전단 전력 식처럼 여러 번 계산할 필요가 없어 간단히 개략적으로 구할 수 있는 장점이 있다.

1) 송전단 전력

① 송전단 유효전력(P_s): \overline{OB}

② 송전단 무효전력(Q_s): \overline{BC}

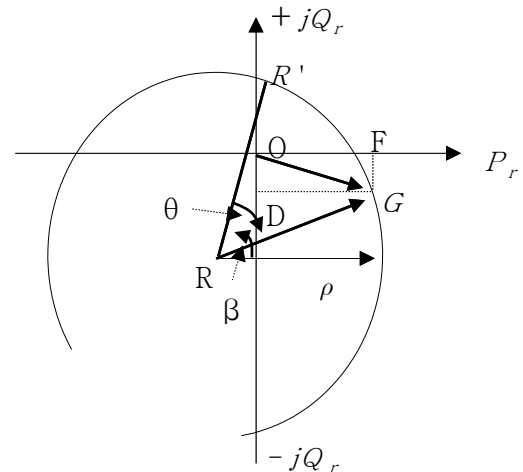
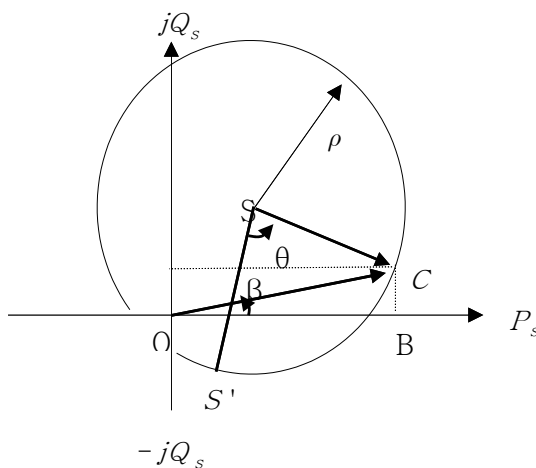
③ 송전단 피상전력(W_s): \overline{OC}

2) 수전단 전력

① 수전단 유효전력(P_r): \overline{OF}

② 수전단 무효전력(Q_r): \overline{FG}

③ 수전단 피상전력(W_r): \overline{OG}



3) 송수전단의 전압 위상각 θ

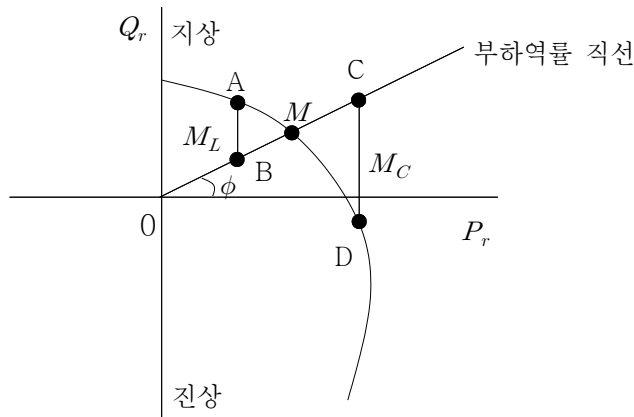
4) 수전단 역률 $\cos\phi = \frac{\overline{OF}}{\overline{OG}}$

5) 손실 $P_l = P_s - P_r = \overline{OB} - \overline{OF}$

6) 효율 $\eta = \frac{P_r}{P_s} \times 100 = \frac{\overline{OF}}{\overline{OB}} \times 100$

7) 조상기 용량: 원선도에 실어주기 위한 Y축의 직선길이

3. 수전단의 조상설비 운용방법



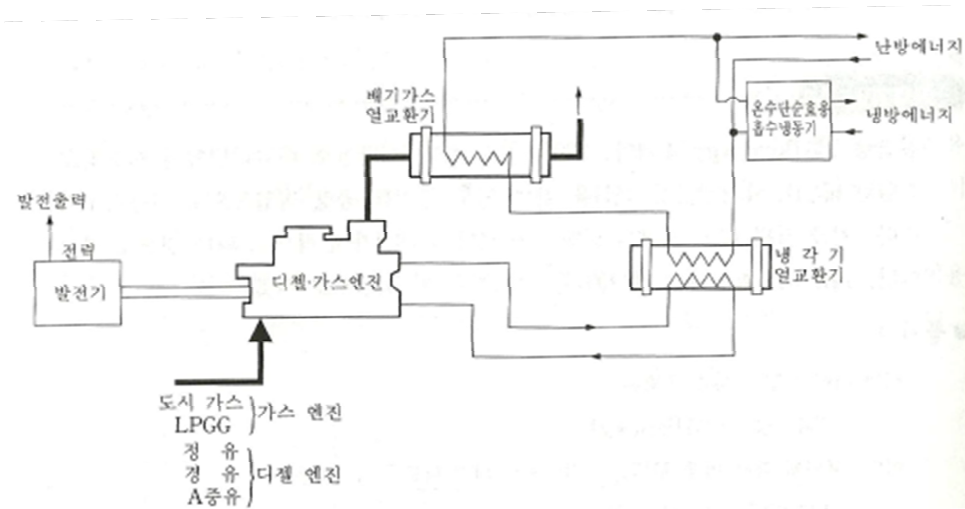
- 1) 정전압 송전방식에서는 송수전단 전력이 반드시 원주 상에 존재해야한다.
- 2) 수전단에서는 부하가 요구하는 무효전력과 원선도(수전원)상에서 정해지는 무효전력 간에 차이가 발생하면 이 차에 해당하는 무효전력을 따로 공급해줘야 한다.
- 3) M점의 경우에는 부하가 요구하는 무효전력과 원선도로 정해지는 무효전력이 일치한 점으로 별도의 조상설비가 필요 없는 점이다. 원주 상에 실린 점.
- 4) B점의 경우에는 부하가 요구하는 무효전력보다 무효전력이 과 공급된 점 이므로 원선도에 실어주기 위해서는 선분길이 M_L 에 해당하는 만큼의 무효전력 소비설비가 필요하다. Shr(병렬 리액터), SVC, STATCON, 동기조상기 등으로 지상무효전력을 소비한다.
- 5) C점의 경우에는 부하가 요구하는 무효전력보다 무효전력이 부족하게 공급된 점 이므로 원선도에 실어주기 위해서는 선분길이 M_C 에 해당하는 만큼의 무효전력 공급설비가 필요하다. SC(병렬콘덴서), SVC, STATCON, 동기조상기 등으로 지상무효전력을 공급한다.

3-2. 디젤엔진, 가스엔진, 가스터빈을 사용한 열병합발전 시스템의 구성도를 그려서 설명하고, 이들 원동기를 적용한 열병합발전시스템의 특징을 비교표로 나타내시오.

답)

1. 디젤엔진, 가스엔진 열병합 발전 시스템 구성도를 그려서 설명

1) 디젤엔진, 가스엔진 열병합 발전 시스템 구성도

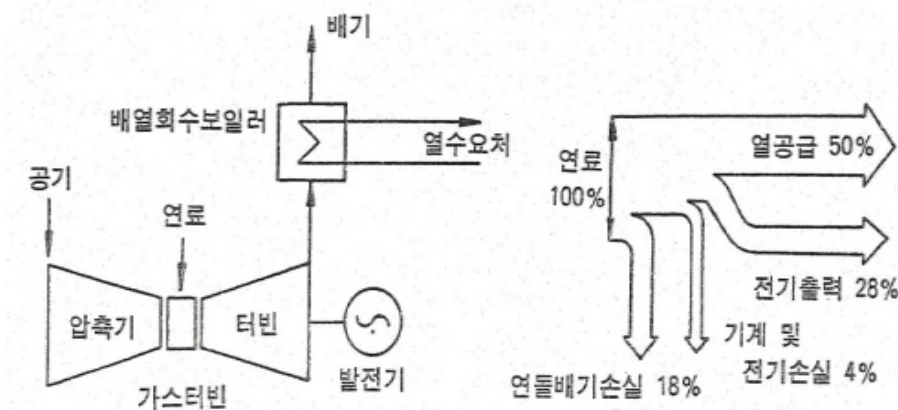


2) 설명

- (1) 가스엔진, 디젤엔진과 연결된 발전기를 이용하여 전력을 생산하고 엔진 배기가스를 이용하여 냉난방에 이용한다.
- (2) 배기가스에서 열교환기로 열을 회수하여 증기로 전환하고 이 증기를 난방에너지로 활용한다.
- (3) 일부 증기를 흡수식 냉동기를 활용하여 냉방에 활용하고 냉방과 난방에서 나온 물을 냉각기 열교환기를 통해 엔진 냉각수의 냉각에 활용한다.
- (4) 냉각기 열교환기를 거친 물을 배기가스 열교환기를 거쳐 증기로 전환한다.

2. 가스터빈을 사용한 열병합발전 시스템의 구성도를 그려서 설명

1) 가스터빈을 사용한 열병합발전 시스템의 구성도



2) 설명

- (1) 공기 압축기를 이용하여 압축공기를 연소기에 보내면 연소기에 연료(정유, 경유, A중유, LP 가스)를 공급하여 연소가스를 발생시키고 이 가스를 가스터빈에 보내 열 낙차를 이용하여 터빈을 구동하고 축과 함께 연결된 발전기를 구동시켜 전기를 생산한다.
- (2) 터빈에서 일을 하고 나온 증기는 배열회수 보일러를 거쳐 연도를 통해 대기로 배출된다.
- (3) 배열회수 보일러는 가스터빈에서 나온 열을 회수하여 급수를 증기로 변환하여 작업용 증기나 난방부하에 증기를 공급한다.

3. 디젤엔진, 가스엔진, 가스터빈 열병합발전 시스템의 특징 비교표

	디젤엔진	가스엔진	가스터빈
적용규모	15~10,000[kW] 소중규모(~1,000[kW])	15~10,000[kW] 소중규모(~1,000[kW])	500~100,000[kW] 중규모(~5,000[kW])
발전효율	30~38[%]	25~35[%]	20~30[%]
종합효율	약 80[%]	약 80[%]	약 80[%]
연 료	정유, 경유, A중유	LP 가스	정유, 경유, A중유, LP가스
시동시간	10초 이내	15초 이내	40초 이내
배열온도	배기가스 450[℃] 전후 냉각수 70~75[℃]	배기가스 500~600[℃]전후 냉각수 85[℃] 전후	배기가스 450~550[℃]
가 격	싸다	약간 싸다	비교적 비싸다.
소 음	(소형)~(대형) 95~105[db](A)	디젤보다 약간 적다.	고조파역에서 높다. 방음커버가 필요함.
진 동	대	대	중
배출가스	1,000~1,300[ppm]	1,000~2,200[ppm]	150~300[ppm]
특 징	발전효율이 높다. 연료단가가 싸다. 실적이 풍부하다. 배기가스 처리가 필요하다. 진동, 소음이 크다. 냉각수 온도가 낮다.	배기가스가 깨끗하므로 열회수가 용이하다. 보수가 용이하다. 진동, 소음이 작다. 가격이 비싸다.	소형경량 콤팩트 냉각수가 필요없다. 진동, 소음이 작다. 발전효율이 낮다.

3-3. 가공선로에 설치되어 있는 가공지선의 전자유도장해 차폐효과를 설명하시오.

답)

1. 가공지선의 전자유도장해 차폐효과를 설명

1) 차폐선의 원리

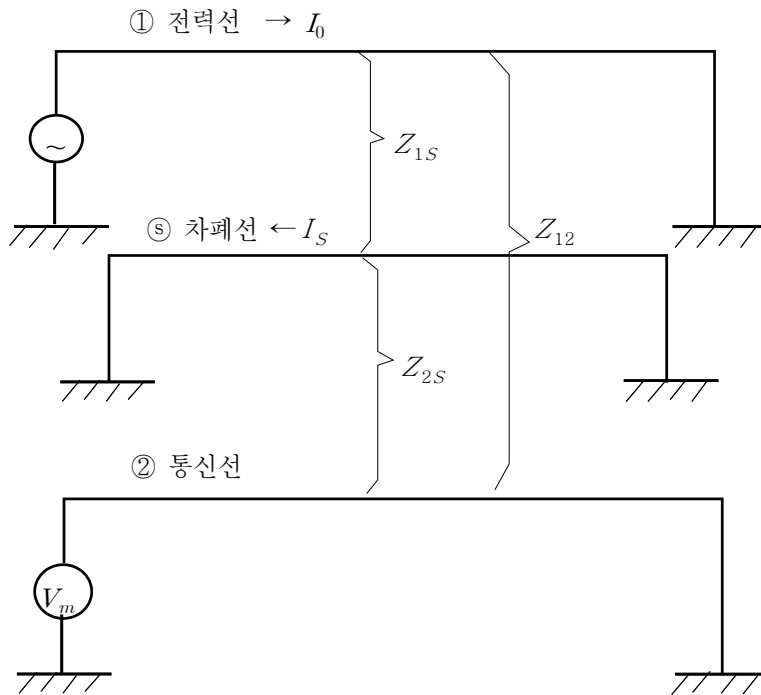
(1) 차폐선의 정의

전력선과 통신선 사이에 대지와 단락시킨 전선을 전력선에 근접해서 설치한 선을 차폐선이라 하며 상호인덕턴스 M 을 저감시킨다.

(2) 원리 설명

- ① 전력선에 전류가 흐르면 상호인덕턴스에 의해 차폐선에 단락전류가 흐르게 된다.
- ② 차폐선에 흐른 단락전류에 의해 통신선에 자속 M' 가 발생 한다.
- ③ 이 자속 M' 와 송전선 전류에 의해 발생된 자속 M 과는 위상이 180° 반대이므로 M 의 값이 줄어들게 되어 결국 통신선에 생기는 유도전압을 반정도로 줄어든다.

2) 차폐선의 차폐효과



I_0 : 전력선 영상전류, I_s : 차폐선 유도전류, Z_0 : 차폐선 자기임피던스

〈 차폐선의 차폐 효과 〉

(1) 차폐계수

$$V_m = -Z_{12}I_0 + Z_{2s}I_s = -Z_{12}I_0 + Z_{2s}\frac{Z_{1s}I_0}{Z_s} = -Z_{12}I_0\left(1 - \frac{Z_{1s}Z_{2s}}{Z_sZ_{12}}\right)$$

- (2) 여기서 $Z_{12}I_0$ 는 차폐선이 없을 경우 유도전압이기 때문에 차폐선을 설치함으로써 $(1 - \frac{Z_{1s}Z_{2s}}{Z_sZ_{12}})$ 만큼 줄어든다는 저감비율을 나타나게 되므로 이것을 차폐계수라 한다.

$$\lambda = \left| 1 - \frac{Z_{1s}Z_{2s}}{Z_sZ_{12}} \right|$$

- (3) 차폐선을 전력선에 접근해서 설치하는 경우 ($Z_{12} \doteq Z_{2s}$)

$$V_2' = -Z_{12}I_0(1 - \frac{Z_{1s}}{Z_s}), \text{ 차폐선의 차폐계수 } \lambda' = \left| 1 - \frac{Z_{1s}}{Z_s} \right|$$

- (4) 차폐선을 전력선에 접근해서 설치하는 경우 ($Z_{12} \doteq Z_{2s}$)

$$V_2'' = -Z_{12}I_0(1 - \frac{Z_{2s}}{Z_s}), \text{ 차폐선의 차폐계수 } \lambda'' = \left| 1 - \frac{Z_{2s}}{Z_s} \right|$$

- (5) 상호인덕턴스 Z_{1s} 에 대해서 차폐선의 자기임피던스 Z_s 를 근접시켜 줄수록 차폐효과는 커진다.
 (6) Z_s 가 작을수록 단락전류 I_s 가 커져서 차폐효과가 커지므로 차폐선은 철선을 쓰지 않고 전력선에 준하는 동 선이나 알루미늄 선을 쓴다.
 (7) 실제 가공지선이 차폐선의 역할을 동시에 수행하고 있다.

3-4. 전원이 제거된 후에 내부에너지에 의하여 동작하는 직렬 RL 회로를 흐르는 전류는 시정수가 10ms인 지수꼴로 감쇠하는 형태를 나타낸다. 저항값을 500Ω 만큼 증가시켰더니 시정수가 절반이 되었다고 한다. 회로의 L을 구하시오.

답)

1. 전원자유 R-L 회로 해석

1) 조건

- (1) 저항과 초기에 충전된 인덕터의 RL직렬회로를 가정한다.
- (2) 인덕터에 흐르는 전류를 $i(t)$, 인덕터 초기전류를 $i(0) = i_0$ 로 가정한다.

2) 인덕터에 저장된 에너지

$$w(0) = \frac{1}{2} Li_0^2$$

3) KVL 적용

$$V_L + V_R = 0, \quad L \frac{di}{dt} + Ri = 0, \quad \frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = 0$$

4) 전류 $i(t)$

$i(t) = Ae^{st}$ 라 가정한다. 여기서 A, s는 상수이다.

$$\frac{d}{dt} Ae^{st} + \frac{R}{L} Ae^{st} = 0, \quad \frac{d}{dt} = s \quad \text{이므로} \quad Ae^{st} \left(s + \frac{R}{L} \right) = 0$$

여기서 $A = 0$ 이거나 $e^{st} = 0$ 이면 $i(t) = 0$ 이 된다. 그러므로 $\left(s + \frac{R}{L} \right) = 0$ 이 되어야 한다.

$$s = -\frac{R}{L}, \quad i(t) = Ae^{-\frac{R}{L}t} \text{가 된다.}$$

5) 초기조건 적용

$$i(0) = A = i_0 \text{이므로}$$

$$i(t) = i_0 e^{-\frac{R}{L}t}$$

6) 시정수

$$\tau = \frac{L}{R} = 0.01 \text{ [s]}, \quad R = 100L$$

7) L 값 구하기

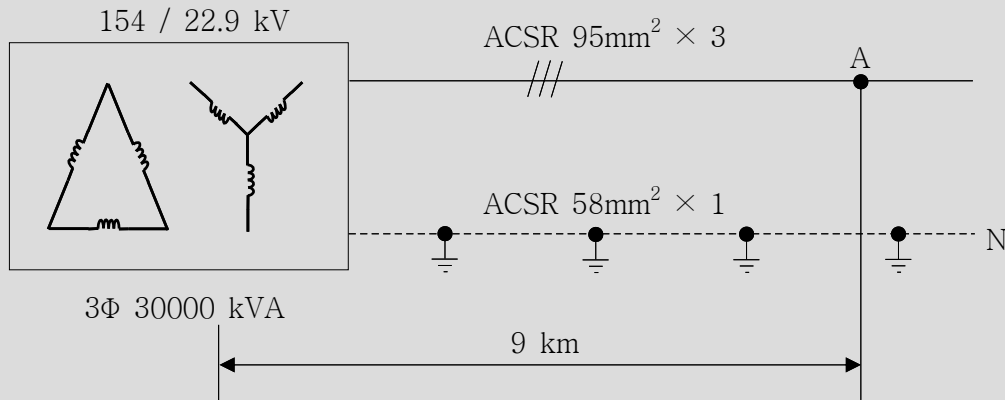
저항을 500 증가시켰을 때 시정수는 절반이라 했으므로

$$\frac{1}{2} \tau = \frac{L}{R+500}, \quad \frac{0.01}{2} = \frac{L}{100L+500}$$

$$\therefore L = 5 \text{ [H]}$$

3-5. 아래와 같은 배전계통의 고장점 A 에서 3상 단락전류(I_{3s})와 1선 지락전류(I_g)를 대칭좌표법으로 구하시오. (단, 소수점 둘째자리에서 반올림한다)

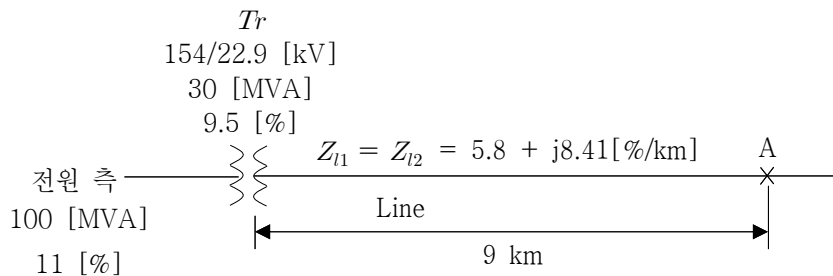
- 전원측(계통) 임피던스: 11% (100MVA기준)
- 주변압기의 임피던스: 9.5% (자기용량에서)
- 3상 단락의 고장 저항은 무시하며, 1선 지락의 고장 저항값은 7.5Ω
- 정상 및 역상 임피던스(ACSR 95 mm²): $5.8+j8.41(\%/km)$
- 영상 임피던스(ACSR 95-58 mm²): $14.02+j32.36(\%/km)$



답)

1. 3상 단락전류 계산

1) 등가 회로도



2) 임피던스 환산

기준용량 100 [MVA] 기준

(1) 전원 측 임피던스 Z_s

$$Z_s = j11 \text{ [%]}$$

(2) 변압기 임피던스

$$Z_t = j9.5 \times \frac{100}{30} = j31.7 \text{ [%]}$$

(3) 선로 임피던스

$$Z_{l1} = 5.8 + j8.41[\%/km] \times 9 \text{ [km]} = 52.2 + j75.7$$

(4) 정상 임피던스 Z_1

$$Z_1 = j11 + j31.7 + 52.2 + j75.7 = 53.1 + j118.4 \text{ [%]}$$

(5) 단락전류 계산

$$I_s = \frac{E}{Z} \text{ [A]} \text{ 이므로 \%식으로 변환하면 } \%Z = \frac{ZI_n}{E} \times 100 \text{ 이므로 } I_s = \frac{100}{\%Z} I_n \text{ 이 된다.}$$

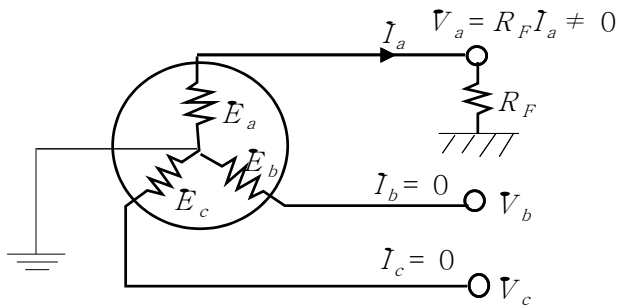
사고 나기 직전 상태가 정상상태이므로 단락전류 $I_s = \frac{100}{\%Z_1} I_n$ 이 되고

$$I_s = \frac{100}{\%Z_1} I_n = \frac{100}{53.1 + j118.4} \times \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22.9} \approx 1,950 \text{ [A]}$$

2. 1선 지락전류 계산

1) 대칭좌표법을 이용한 지락전류 식 산출

(1) 회로도



E_a, E_b, E_c : 무부하 발전기 내부유기기전력

V_a, V_b, V_c : 각상 단자전압

I_a, I_b, I_c : 각상전류

R_F : 고장점 지락저항

(2) 기지값

$$V_a = I_a R_F, I_b = I_c = 0 \quad a\text{상 저항지락}$$

(3) 미지값

$$I_a$$

(4) 대칭분 전압, 전류

$$I_b = I_c = 0 \text{ 에서 } I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0 \quad \text{----- ①}$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 = 0$$

$$I_b - I_c = (a^2 - a) I_1 - (a^2 - a) I_2 = 0$$

$$(a^2 - a)(I_1 - I_2) = 0 \quad a^2 - a \neq 0 \quad I_1 = I_2 \quad \text{---- ②}$$

② 식을 ① 식에 대입하면

$$I_0 + a^2 I_1 + a I_1 = I_0 + (a^2 + a) I_1 = 0 \quad a^2 + a = -1 \text{ 이므로 } \therefore I_0 = I_1 = I_2$$

(5) 발전기 기본식 활용

$$V_0 = -Z_0 I_0 \quad V_a = I_a R_F \text{ 에서 } V_a = V_0 + V_1 + V_2 = I_a R_F$$

$$V_1 = E_a - Z_1 I_1 \quad I_0 = I_1 = I_2 \text{ 이므로 } E_a - (Z_0 + Z_1 + Z_2) I_0 = 3 I_0 R_F$$

$$V_2 = -Z_2 I_2 \quad E_a = (Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 R_F) I_0$$

$$\therefore I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3 R_F}$$

(6) 1선 지락전류 식

$$I_a = I_g = I_0 + I_1 + I_2 = 3I_0 = \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F}$$

(7) % 식으로 환산

$$\%Z_0 = \frac{Z_0 I_n}{E_a} \times 100, \quad Z_0 = \frac{\%Z_0 \times E_a}{100 \times I_n}$$

$$\%Z_1 = \frac{Z_1 I_n}{E_a} \times 100, \quad Z_1 = \frac{\%Z_1 \times E_a}{100 \times I_n}$$

$$\%Z_2 = \frac{Z_2 I_n}{E_a} \times 100, \quad Z_2 = \frac{\%Z_2 \times E_a}{100 \times I_n}$$

$$\%R_F = \frac{R_F I_n}{E_a} \times 100, \quad R_F = \frac{\%R_F \times E_a}{100 \times I_n}$$

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{3E_a}{Z_0 + Z_1 + Z_2 + 3R_F} \\ &= \frac{3E_a}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2 + 3 \times \%R_F} \times \frac{100I_n}{E_a} = \frac{3 \times 100I_n}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2 + 3 \times \%R_F} \end{aligned}$$

2) 임피던스 환산

(1) 역상 임피던스

$$Z_2 = Z_1 \text{ 이므로 } Z_2 = 53.1 + j118.4 [\%]$$

(2) 영상 임피던스

① 변압기 결선이 $\Delta-Y$ 이므로 전원측 임피던스는 포함하지 않는다.

② 지락점의 저항값은 영상 전원을 두어 대칭분 영상회로를 구성하므로 영상회로에 포함시키지 않는다.

$$\textcircled{3} Z_0 = Z_t + Z_{l0} = j31.7 + (14.02 + j32.36) \times 9 = 126.2 + j322.9$$

(3) 지락저항 값 R_F

$$\%R_F = \frac{P \times R_F [\Omega]}{10 V^2} = \frac{100 \times 10^3 \times 7.5}{10 \times 22.9^2} = 143.3 [\%]$$

3) 1선 지락전류 I_g

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{3 \times 100I_n}{\%Z_0 + \%Z_1 + \%Z_2 + 3 \times \%R_F} \\ &= \frac{3 \times 100}{126.2 + j322.9 + 2(53.1 + j118.4) + 3 \times 143.3} \times \frac{100 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 22.9} \\ &\doteq 875 [\text{A}] \end{aligned}$$

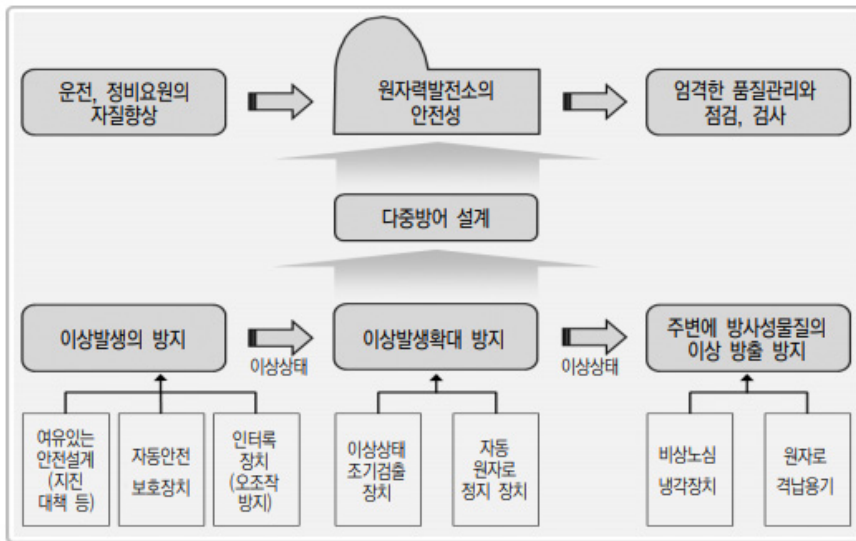
3-6. 원자력 발전의 안정성 확보를 위한 심층방어 개념과 원자로 사고예방 대책에 대하여 설명하시오.

답)

1. 심층방어의 개념

1) 개념

이상상태의 발생을 가능한 방지하되, 이상상태가 발생하였을 때에는 이의 확대를 최대한 억제하며, 만일 이상상태가 확대되어 큰 사고로 진전되었을 때에는 그 영향을 최소화하고, 주변 주민을 보호 하도록 사고의 진전 단계마다 적절한 방어체계를 갖추는 것을 말한다.



〈 심층방어 개념 〉

2) 이상상태의 발생 방지수단

모든 시설에 대하여 충분한 안전 여유도를 갖도록 설계하고 있으며 안전에 중요한 설비는 고장에 대비하여 설비를 다중으로 갖추어 두고 있다.

3) 이상상태 발생으로 인한 사고파급 방지

확률적으로 이상상태의 발생가능성이 매우 낮지만 만일 기기의 고장이나 운전원의 실수가 겹쳐 이상상태가 발생하면 원자로보호설비가 이를 자동적으로 감지하여 원자로를 안전하게 정지시킴으로써 원전 연료가 손상되는 등의 중대한 사고로 진전되는 것을 방지해 준다.

4) 이상상태 발생 시 다중보호

그럼에도 불구하고 만에 하나 중대한 사고가 발생하거나 발생할 가능성이 있는 경우 비상노심 냉각 장치와 원자로건물 등 안전설비가 사고의 진전을 완화시키고 방사성물질이 주변 환경으로 누출되는 것을 방지하도록 설계되어 있다.

2. 원자로 사고예방 대책

1) 사고예방설비

(1) 원자로보호계통

원자로의 이상을 감지하여 경보(Alarm)나 원자로 정지신호를 발생시키고 나아가서는 공학적 안전설비를 작동시키는 계통이다. 원자로보호계통은 잘못된 신호에 의해서 원자로가 정지되지 않고 실제신호에 의해서만 안전하게 정지될 수 있도록 다중논리회로(2 out of 3 또는 2 out of 4) 설계개념을 채택하고 있다.

(2) 원자로정지계통

원자로정지계통은 다른 원리의 독립된 2개의 정지계통을 보유하고 있다. 1개의 계통은 제어봉을 이용하고 다른 1개의 계통은 보완장치로서 봉산주입계통이 사용되고 있다.

(3) 비상노심냉각계통

비상노심냉각계통은 노심 내에 축적된 열과 붕괴열을 제거하기 위한 설비로서 다른 원리의 독립된 계통을 다중으로 설치하고 있다.

2) 사고완화 설비

(1) 원자로격납건물

방사성물질이 수용되어 있는 원자로 및 1차 계통을 기밀성이 유지되는 강화된 철근 콘크리트 건물 내에 수용하여 만일의 사고 시에도 방사성 물질의 외부누출을 방지하도록 설계되어 있다.

(2) 원자로격납건물 살수계통(Spray System)

사고 시 격납건물 내의 압력을 단시간 내에 저하시켜 외부로의 방사성물질 누출을 감소시키고
요오드 등의 방사성물질을 격납건물 안에서 제거하기 위한 계통이다.

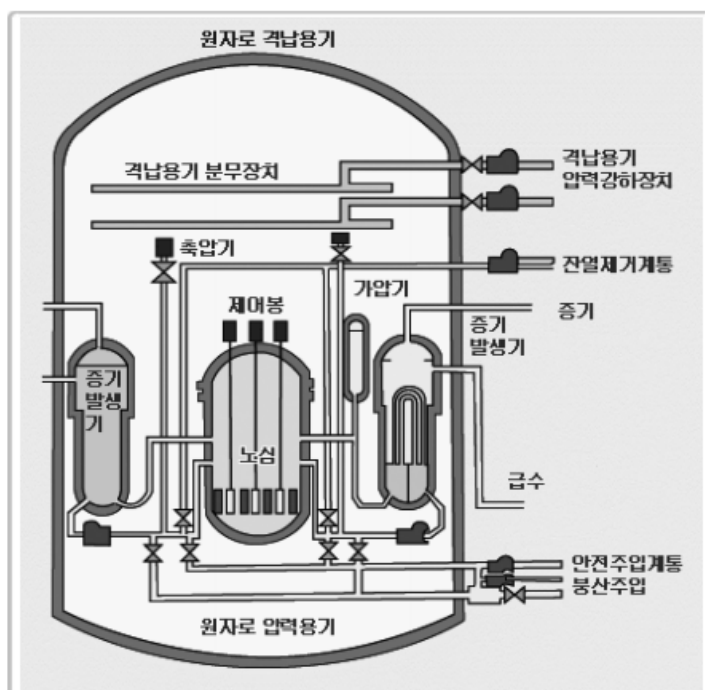
(3) 공기 재순환계통

원자로 격납 건물 내의 공기를 재순환시켜 필터를 이용하여 방사성 물질을 제거하는 계통이다.

(4) 비상가스 처리계통

원자로격납건물 내부기체의 방사성물질을 필터를 통해 제거하여 깨끗한 기체만 배기계통으로 배출하는 계통이다.

3) 안전 설비



제 4교시 문제풀이

4-1. 발전기를 전력계통에 병입하여 운전하고자 할 때 발전기의 병렬운전 조건을 제시하고 계통병입 절차 및 동기검정 방법을 설명하시오.

답)

1. 발전기의 병렬운전 조건

1) 기전력의 크기가 같을 것.

기전력의 크기가 같지 않으면 무효순환전류가 흘러 양기간의 역률이 변하고 출력에는 영향이 없고 양발전기 사이를 순환하여 저항손을 발생시킨다.

2) 기전력의 위상이 같을 것.

기전력의 위상이 같지 않으면 동기화 전류가 흘러 양기간의 부하분담이 변하게 된다. 위상이 빠른 발전기는 부하증가로 과부하를 초래할 수 있다.

3) 기전력의 주파수가 같을 것.

주파수가 다르면 순시 파형에서 위상이 일치하지 않는 시간차가 생겨 동기화 전류가 양기 사이에 교대로 주기적으로 흐르게 되어 난조가 발생하고, 심하면 발전기가 계통으로부터 탈조한다.

4) 기전력의 파형이 같을 것.

2 개의 기전력의 실효치가 같고 위상이 같은 경우에도 그 파형이 다르면 각 순간의 기전력이 같지 않기 때문에 고조파 무효순환 전류가 흘러서 전기자 권선의 동손이 증가되어 과열의 원인이 된다. 실제의 운전에는 큰 문제가 없다. 발전기 권선 제작 시 파형이 결정된다.

5) 상회전 방향이 같을 것.

상회전 방향이 다르면 등가적으로 단락상태가 되어 발전기가 소손된다.

2. 계통 병입 절차 및 동기검정 방법

발전기를 계통에 병입하는 방법에는 동기검정기를 이용하는 수동병입과 자동제어 장치에 의한 자동병입 방법이 있다.

1) 동기투입계전기: Synchronizer(25A): 동기투입계전기를 이용한 자동투입

(1) Voltage balancer

AVR로 제어 신호(Pulse)를 보내어 발전기의 전압을 계통전압에 일치시키도록 한다.

(2) Speed matcher

Governor control equipment로 제어 신호(Pulse)를 보내어 발전기의 주파수를 계통주파수에 일치시키도록 한다.

(3) Sensing of phase angle difference

계통의 전압차와 주파수차가 허용범위에 있고, 각 변위가 $\pm 15^\circ$ 이내에 있을 때 "a" 점점신호를 보내며, 자동동기의 경우 이 점점은 차단기 Closing 명령 점점 신호 "25"과 직렬로 사용되어 진다.

(4) Synchro closing

동기지점에서 차단기를 투입하기 위해서, 발전기와 계통간의 전압 차, 주파수차가 허용범위 내에 있을 때, 동기 시점 이전 즉 동기시점 안에 차단기를 투입시키기 위해서 미리 투입신호 "25"를 보내게 된다. 정상적인 동기투입의 경우 투입명령신호 '25'는 동기투입시기에서 200ms 이후에 "Off"가 되며, 10Sec. 이후에 End를 지시하게 된다.

(5) 발전 측 전압의 불균형의 검출

발전기 측에서 3상 전압이 불균형이 되었을 때 투입신호가 정지된다.

(6) 차단기의 Advance time Setting

다른 시간을 갖는 2개 이상의 차단기의 경우 차단기 투입 Setting(3종류의 세팅)이 가능하다.

(7) 동기실패 신호점점(for alarm)

투입신호 이후, 동기시점이 지난 후 발전기와 계통간의 각변위 차가 10° 이상일 경우, 투입 신호가 정지되고, Alarm 점점이 400ms간 지속된다. ΔV , $\Delta f \pm 15$ 가 주어진 범위 안에 있으면 입력 신호 "START"가 지속되어진다. 이때 Alarm은 Power supply source 의 Off에 의해서 Reset된다.

(8) 발전기 측의 Phase 방향이 역일 때 제어기능의 정지

발전기가 오결선이 될 때 발전기의 상회전방향이 역이 되므로 이때 Alarm점점이 "ON"된다.

(9) 숫자 키의 Setting

10 숫자의 키에 의해 위에서 언급한 1) - 6) 까지의 설정 될 수 있다.

2) 동기검정기에 의한 수동투입

(1) 여자기용 차단기(Exciter Field Breaker)를 투입한다.

(2) 수동 전압조정기(70M)로 발전기 단자 전압을 정격전압까지 상승시킨 다음 편차를 0으로 맞춘다.

(3) AVR을 자동 위치(90R)로 한다.

(4) Synchro 스위치를 켜다.

(병입조건 확인을 위한 전압계, 주파수계, 동기검정기가 작동한다)

- 발전기측 전압은 자동전압조정기(90R)의 설정값을 변경시켜 조정

- 발전기측 주파수 조정은 터빈 속도로 조정

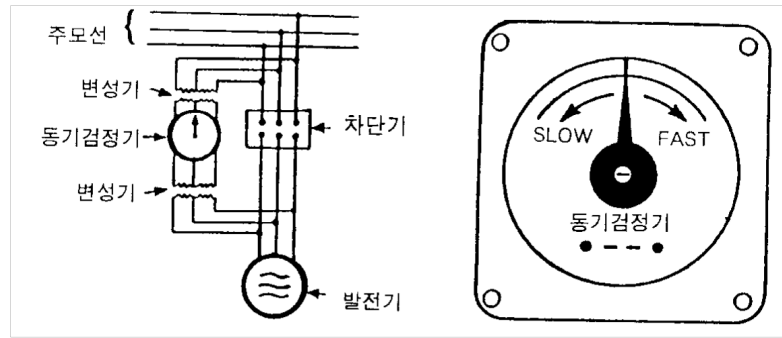
- 발전기측 위상의 조정은 터빈속도 즉 터빈에 유입되는 증기의 량으로 조정

(5) 동기검정기 지침이 시계방향(Fast)으로 회전하여 12시 5분전 위치에 왔을 때 차단기를 투입한다.

- 동기검정기에서 시계방향(Fast)은 발전기 측 위상이 앞섬을 뜻함

(6) 계통병입이 되면 출력을 초기부하까지 증발시킨다.

- 발전기가 병입된 후 출력을 즉시 초기부하까지 상승시켜 역전력 계전기에 의한 발전기 비상정지를 방지해야 함



<그림 2> 동기검정기(Synchroscope)

3) 동기검정등을 이용한 동기검정 확인 방법

- (1) 한 개의 전구 a는 스위치의 대응 단자에, 다른 2개의 전구 b, c는 스위치의 대응하지 않는 단자에 교차해서 접속되어 있다.
- (2) 양쪽 전원의 전압이 같고, 주파수나 위상도 일치된 상태에서는 전구 a는 불이 꺼지고 b, c는 같은 밝기로 점등된다.
- (3) 이것이 동기상태이며, 이 때 3상 스위치를 닫아도 두 전원 사이에는 전류가 흐르지 않는다.
- (4) 만약 동기기의 회전수가 부적당 하면 전구는 점멸을 되풀이 한다. 또한, 위상차가 발생하면 3개의 전구의 밝기가 달라진다.

4-2. 케이블 DC내전압시험과 비교해서 AC내전압시험의 일종인 VLF(very low Frequency) 시험의 필요성을 설명하고, VLF 내전압시험, VLF TD($\tan \delta$)시험, VLF PD(부분방전) 시험법에 대하여 각각 설명하시오.

답)

1. VLF 시험의 필요성

- 1) Cable 열화로 인한 정전발생 시 수용가 피해를 방지한다.
- 2) 사고점 탐사와 사고복구에 소요되는 시간을 경감시킨다.
- 3) Cable의 교체주기 결정할 수 있다.
- 4) 케이블 교체에 따른 계획적이고 효율적인 투자계획을 수립할 수 있다.
- 5) 계획적인 케이블 교체에 따른 전력공급의 신뢰도가 향상된다.

2. VLF 용어 정리

1) VLF (Very Low Frequency) 장치

0.01 ~ 1Hz의 저주파 전원공급장치를 말하며, 한전에서는 0.1Hz 주파수의 전원을 사용한다.

2) VLF TD ($\tan \delta$) 측정

VLF 전원을 케이블에 인가한 후 전압과 전류의 위상각으로 케이블 유전 손실률을 측정하는 행위를 말한다.

3) VLF PD (Partial Discharge) 측정

VLF 전원을 케이블에 인가한 후 불량점에서 발생하는 부분방전의 크기(전류량)를 측정하는 행위를 말한다.

4) VLF 내전압시험

VLF 전원을 케이블에 일정시간동안 인가하여 절연파괴 발생 여부를 확인하는 시험방법을 말한다.

5) PD 모니터링 VLF 내전압시험

VLF 내전압을 시행하는 동안 PD를 동시에 관측하여 불량점 존재여부를 확인하는 시험방법을 말한다.

3. VLF 내전압 시험

1) 시험방법

- (1) 케이블의 도체 부분에 전원부를 연결한다.
- (2) 케이블 접지부분을 장비의 접지선과 연결하여 회로를 구성한다.
- (3) 주파수 0.1[Hz]의 사인파 전압을 시작전압 V에서 1분간 전압을 인가하고 1분이 경과되면 인가 전압을 증가시키는 방식으로 진행한다.

2) 케이블 시험용 전원의 용량

$$Q_c = VI_c = 2\pi f CV^2 [kVA]$$

V: 시험전압 [kV], f: 시험전원의 주파수 [Hz], C: 케이블의 정전용량 [F]

f는 Q_c 에 비례하게 된다.

시험용 전원용량을 줄이기 위해서는 주파수를 낮추어 시험하면 시험용 전원의 용량을 대폭 줄일 수 있다.

3) VLF 내전압 시험 특징

- (1) 현장적용성이 우수하다.
- (2) 케이블 연화진단이 가능하다.
- (3) 장비의 스마트화로 $\tan\delta$, PD, DC 내전압 등을 한 장비에서 가능하다.

4) VLF 내전압 시험의 장점

- (1) 주기적인 극성의 교번으로 공간전하 미축척
 - ※ 공간전하(Space Charge)
 - 물체 내의 어떤 일정 영역에 공간적으로 정 또는 부로 대전되는 현상
 - 물체의 양단에 전위차가 인가될 경우 물체 내 다른 물질과의 계면에 인가된 전극의 반대 극성의 이온(전하)가 집중되는 현상
- (2) DC 내전압에 비해 경량의 장비로 높은 시험전압 인가 가능
- (3) 유전정점, 부분방전, 누설전류, 손실계수 등 여러 가지 스펙트럼 분석으로 열화진단 및 판정 용이
- (4) 타 시험에 비해 결선 등이 간단하고, 이동이 용이하여 현장 측정이 용이
- (5) 별도의 큰 시험용 전원 불필요

5) VLF 내전압 시험의 단점

- (1) 측정 및 진단에 약간의 숙련도가 요구됨
- (2) 주파수를 0.1[Hz] 등으로 낮출 경우 공간전하 축적시간이 길고 축적될 가능성이 있다.
- (3) 사전 상태에서만 측정 가능
- (4) 반드시 시스가 있는 케이블에만 측정가능하다.
- (5) 장비가격이 비교적 고가이다.

4. VLF TD($\tan\delta$)시험

1) 기본원리

$\tan\delta$ 의 기본원리는 케이블에 전원을 인가하여 전압 위상과 전류 위상의 변화량을 측정하는 방식으로 이 값에 의해 케이블의 열화 여부를 판별하는 진단법이다.

2) 유전체 손실

$$W_d = VI_R = wCV^2\tan\delta$$

3) 유전정점

$$\tan\delta = \frac{I_R}{I_c} = \frac{1}{wCR}$$

- 4) 위 식에서 누설전류 I_R 이 클수록 $\tan\delta$ 가 커지며 이 경우 절연물이 불량에 가깝다는 것을 알 수 있다.

5. VLF PD 시험

1) 원리

- (1) 순수한, 부분방전이 없는 정현파 0.1Hz 파형을 케이블의 상-대지간 유효전압의 2배까지 전압을 인가하여 절연체 결함 부분에서 부분방전을 발생시킬 수 있다.
- (2) 부분방전은 절연체의 내부의 이물질, 공극 등에서 전계차에 따른 미소부분 방전량을 측정하는 방법
- (3) 케이블, 접속재, 종단접속재 등 여러 결함위치로부터 PD의 크기와 위치를 측정하고 기록하는데 진행파 방법을 사용할 수 있다.
- (4) VLF PD 측정은 비파괴적인 방법으로 절연체 결함의 위치와 심각한 정도를 검출하는 데 사용되는 진단기법이다. VLF와 상용주파에서 측정된 PD의 특성은 서로 차이가 있을 수 있다.
- (5) 외부 노이즈에 매우 취약하여 차폐실에서 측정해야 하지만 현장 설치된 케이블을 VLF 장비로 시험은 현실적으로 많은 오차를 동반하는 경우가 대부분이다.

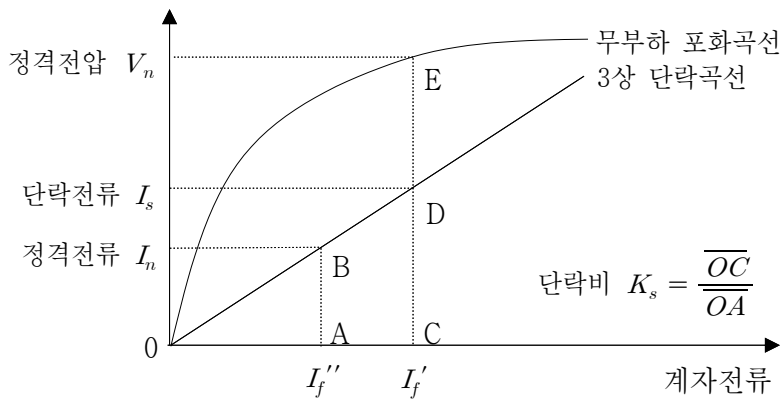
4-3. 발전기의 단락비의 의미를 설명하고, 장거리 송전선로에서 발전기가 자기여자(self excitation) 현상을 일으키지 않을 조건을 설명하시오.

답)

1. 단락비의 의미를 설명

1) 정의

무부하시험에서 정격전압을 유지하는데 필요한 계자전류 (I_f')
3상 단락시험에서 정격전류와 같은 지속전류를 흘리는데 필요한 계자전류 (I_f'')



< 단락비의 무부하, 단락곡선을 이용한 표현 >

$$K_s = \frac{I_f'}{I_f''} = \frac{\overline{OC}}{\overline{OA}} = \frac{\overline{CD}}{\overline{AB}} = \frac{I_s}{I_n} \quad Z_s = \frac{V_n}{I_s} = \frac{\overline{CE}}{\sqrt{3} \overline{CD}}$$

$$\%Z = \frac{Z_s I_n}{E} = \frac{\overline{CE}}{\sqrt{3} \overline{CD}} \times \frac{\overline{AB}}{\overline{CE}} = \frac{\overline{AB}}{\overline{CD}} = \frac{1}{K_s} \quad \therefore K_s = \frac{1}{\%Z} = \frac{1}{X_d}$$

2) 적정 단락비

- (1) 발전기가 자기여자 현상을 일으키지 않고 안전하게 선로를 충전할 수 있는가 없는가를 나타내는 정수

$$K_s \geq \frac{Q'}{Q} \left(\frac{V}{V'} \right)^2 (1 + \sigma)$$

- (2) 수차 발전기: 1.0 ~ 1.2

- 터빈발전기: 0.6 ~ 0.8

3) 단락비가 구조, 성능에 미치는 영향

- (1) 단락비가 큰 기계의 구조

- ① 발전기 구성 재료로 철을 많이 사용 (철기계)
- ② 구리가 비교적 적다

- (2) 단락비가 큰 기계의 성능

- ① 동기 임피던스가 작다. (X_d) 단락전류가 크다.
- ② 공극이 크기 때문에 전기자 반작용의 영향이 작다. 전기자 기자력이 작고 계자 기자력은 크다.
- ③ 과부하 내량이 크면서 관성정수가 커서 안정도가 향상 된다.
- ④ 철손, 기계손이 증가하여 효율이 저하한다.

- ⑤ 기계가 대형, 중량, 가격이 비싸진다. 회전자 지름이 크다.
- ⑥ 전압변동률이 작다. (X가 작아 ΔV 가 작다)
- (3) 단락비가 작은 기계의 구조
발전기 구성 재료로 동을 많이 사용
- (4) 단락비가 작은 기계의 성능
 - ① 동기 임피던스가 크다. (X_d) 단락전류가 작다.
 - ② 공극이 작기 때문에 전기자 반작용의 영향이 크다. 전기자 기자력이 크고 계자 기자력은 작다.
 - ③ 과부하 내량이 작고 관성정수가 작아서 안정도가 저하한다.
 - ④ 철손, 기계손이 감소로 효율이 증가한다.
 - ⑤ 기계가 소형, 경량화 되서 가격이 저렴하다. 회전자 지름이 작다.
 - ⑥ 전압변동률이 크다. (X가 커서 ΔV 가 크다)
- (5) 화력기에서 최근 보호계전기가 고속화 되고 여자 속응도가 좋아져서 안정도가 향상되어 단락비를 적게 하여 제작비를 줄이는 추세이다.

2. 발전기가 자기여자(self excitation) 현상을 일으키지 않을 조건

1) 자기여자의 정의

송전선로를 시충전 할 경우 용량이 작은 발전기로 시충전하면 여자를 가하지 않은 상황에서도 발전기 단자전압이 이상 상승하는 현상을 발전기 자기여자 현상이라 한다.

2) 자기여자 현상과 단락비의 상관관계

- (1) 한 대의 발전기로 자기여자를 일으키지 않고 V' 의 전압으로 충전할 수 있는지 여부를 조사하기 위해서는 발전기의 단락비가 다음식의 K_s 보다 큰가를 알아보면 된다.

$$K_s \geq \frac{Q'}{Q} \left(\frac{V}{V'} \right)^2 (1 + \sigma) \quad V' : \text{충전전압}(kV), V : \text{발전기 정격전압}(kV)$$

Q : 발전기의 정격용량(MVA), σ : 정격전압에 있어서 포화계수(0.05 ~ 0.15)

Q' : 충전전압 V' 에 대한 송전선의 소요충전용량(MVA), K_s : 단락비

- (2) 위 식으로부터 단락비가 큰 발전기 일수록 송전선로 충전에 적합함을 알 수 있다.
- (3) 발전기가 자기여자 현상을 일으키지 않을 조건
발전기 용량이 선로의 충전용량 보다 커야한다.

$$Q \geq \frac{Q'}{K_s} \left(\frac{V}{V'} \right)^2 (1 + \sigma)$$

- ① 단락비가 큰 발전기로 시충전 한다.
- ② 선로의 충전용량을 감소시키기 위해 병렬리액터 등을 설치해서 전기적 거리를 짧게 한다.
- ③ 발전기를 저여자로 운전해서 선로 무효전력을 흡수한다.
- ④ 발전기를 병렬 운전하여 용량을 키운다.
- ⑤ SVC, STATCON 등을 설치하여 무효전력을 흡수한다.

4-4. 케이블에 전기적 고장이 발생한 경우 사고점 탐지법을 3가지 들고 설명하시오.

답)

1. 개요

케이블의 사고 시에는 재폐로를 하지 않으므로 고장점 탐사기법을 이용하여 사고점을 신속히 탐색하여 사고를 제거하는 것이 신뢰도 측면에서 중요하다.

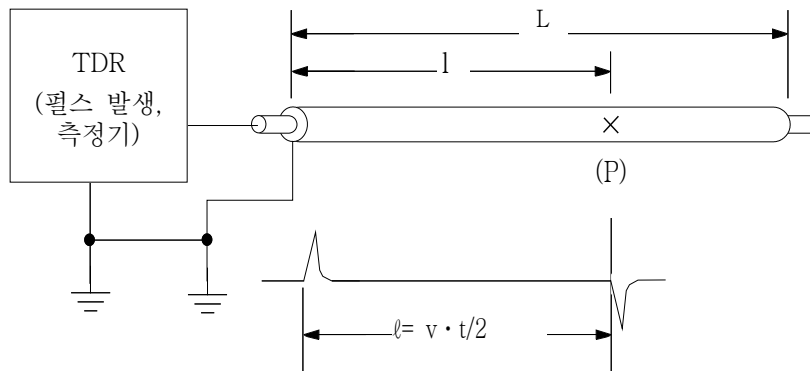
고장점 탐지법은 과거에는 머레이루프법과 펄스레이더 법을 사용하였으나 근래에는 머레이루프법은 상요하지않고 있고, 펄스레이다법, 디케이법, 아크반사법, 편포인트법 등이 실용적으로 사용되고 있다.

2. 케이블의 고장점 탐지법

1) Pulse Radar법

(1) 원리

펄스발생기로 펄스를 케이블에 전파시키면 처음파가 고장점(단락점)에서 반사되어 2파로 되어 발신점으로 돌아온다. 이 시간을 측정하여 거리를 계산한다.

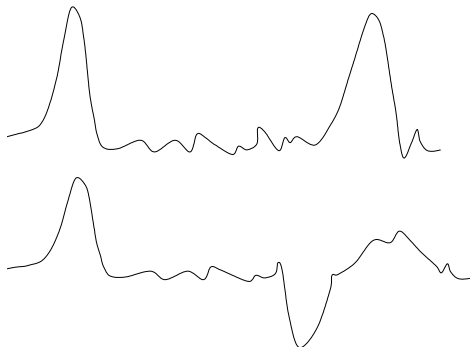


[펄스 반사법 회로도]

$L = \frac{vt}{2}$ 여기서 v 는 케이블내의 Pulse 전파속도, L : 고장거리

t 는 1파와 2파의 시간차 (싱크스코프를 이용하여 측정)

(2) 건전케이블과 고장케이블의 반사파형 비교



건전 케이블의 파형 $Z = \infty$ 일 때 정반사

고장 케이블의 파형 $Z = 0$ 일 때 부반사

고장점

- (3) 펄스 레이더 법은 고장점에 습기가 많은 장소와 고장점과 대지간 저항이 작은 경우에 적용하며, 최근에 생산되는 측정기기들은 고장점까지의 거리를 자동 계산하여 알려주는 Program을 내장하고 있다.

(4) 특징

– 장점

- ① 지락, 단락, 단선고장의 어느 것에나 적용가능
- ② 병행 건전상이 필요 없어 3상동 시 고장점 측정에 적합
- ③ 케이블 전장의 길이가 불분명하여도 측정가능

– 단점

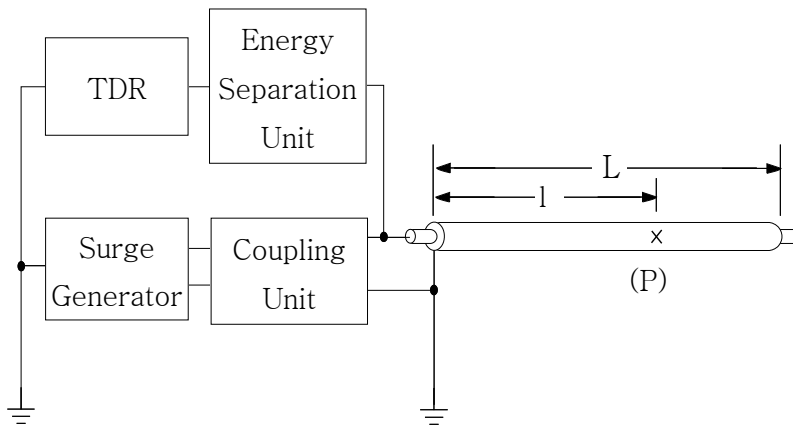
- ① 측정정도가 Murray Loop법에 비하여 나쁘다. 오차 2 ~ 5%
- ② 측정기의 조작, 특히 pulse의 판독에 숙련이 필요하다.

2) 아크 반사법 (Arc Reflection Method)

(1) 원리

- ① 케이블의 고장점과 대지간 임피던스가 높은 경우(통상 100Ω 이상)에는 펄스 반사가 미약하거나 전혀 없으므로 펄스레이더법으로 고장점 거리를 측정할 수 없게 된다.
- ② 아크 반사법은 이러한 경우에 TDR(Time Domain Reflectmeter: 펄스 발생, 측정기기)과 Surge 발생기기를 병행하여 고장점을 측정하는 방법이다.

즉, Surge 발생기로 고장점에 아크를 발생시키면 아크 발생 순간에 고장점의 임피던스는 낮아진다. 이 때 임피던스가 변한 지점에서 반사된 펄스파의 진행시간을 측정하여 고장점 거리를 측정하는 방법이다.

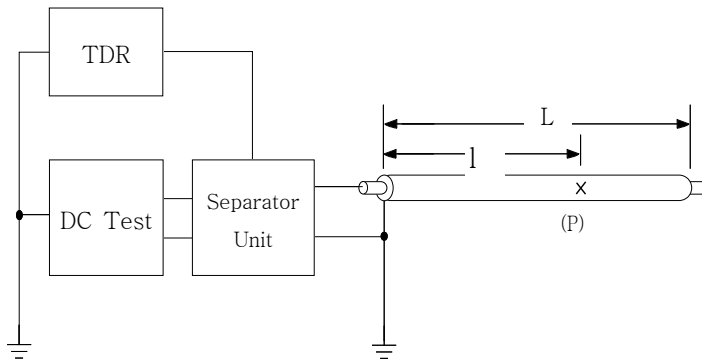


[아크 반사법의 측정 회로도]

3) Decay법(Traveling Wave법)

(1) 원리

Decay법은 아크반사법으로 고장점을 찾지 못할 경우 사용하는 방법으로, DC 내 전압기를 이용하여 고장점에 Flashover를 일으켜, 이때 발생하는 과도 전압파형을 TDR로 포착, 분석하여 고장점 거리를 계산한다.



[Decay법의 회로도]

(2) 특징

이 방법은 케이블 고장점을 태워(Burning) 지락저항을 낮추는데도 이용되나, 저항값이 너무 낮아지면 고장점 측정이 곤란하므로 주의를 요한다.

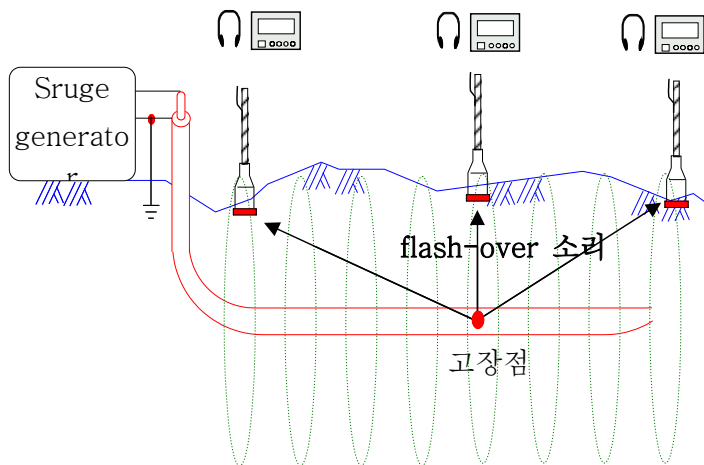
4) 고장점 정밀탐지법(Pinpointing)

(1) 개요

- ① Pinpointing은 머레이 루프, 펄스 레이다, 아크반사, Decay법 등의 고장점 탐지법으로 개략적인 고장점 거리를 측정 후, 정확한 고장위치를 찾기 위한 방법이다.
- ② 지금까지 개발되어 있는 고장점 정밀 탐지법은 써지코일법, 방전탐지법, 음향법, 전위법 등이 있으며, 이중 음향법이 가장 널리 이용되고 있다.

(2) 음향법의 원리

- ① 음향법은 Surge를 고장 케이블에 보낸 후, 고장점에서 flash over로 인한 방전음을 탐지하는 방법으로, 고장점에 가까울수록 방전음이 커진다.
- ② 최근에 생산되는 고장점 탐지기는 단순히 음향만 측정하는 것이 아니라, 보다 정확한 위치 탐지와 외부 소음에 의한 영향을 줄이기 위하여 여러 가지 방법을 병행하고 있다.



[음향과 자기장을 이용한 고장점 정밀탐지법]

- ③ 여기서는 음향의 크기뿐만 아니라, Surge pulse에 의한 자기장과 flash over 방전음간의 시차를 이용하여 고장점을 탐지하는 방법이다.
- ④ 자기장 감지시간은 케이블 전구간에서 동일하고, 음향 감지시간은 고장점에 가까울수록 짧으므로, 자기장 감지와 음향 감지시간차가 가장 짧은 위치가 고장점이 된다.

4-5. 전력계통의 과도안정도 해석에서 다음을 설명하시오.

- a) 2회선 중 1회선의 고장 시, 일정시간 후 고장 난 1회선이 차단되었을 경우 등면적법으로 안정도를 판별하는 방법
- b) 임계고장 차단시간(critical clearing time)

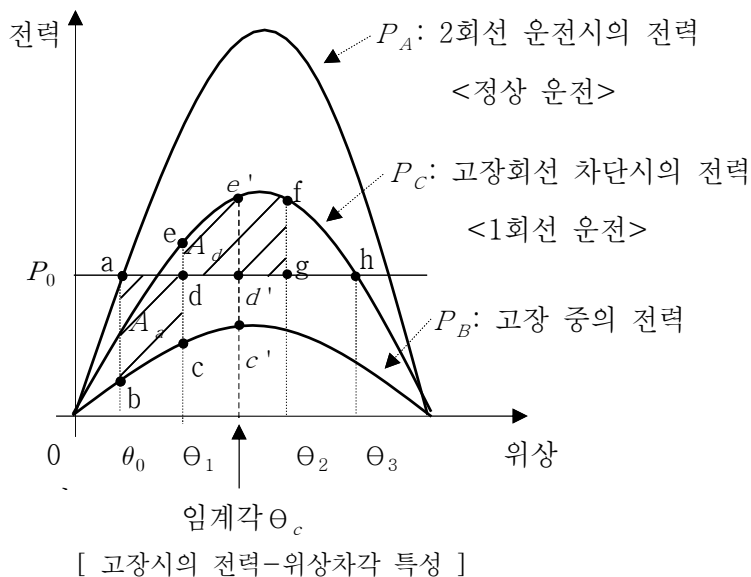
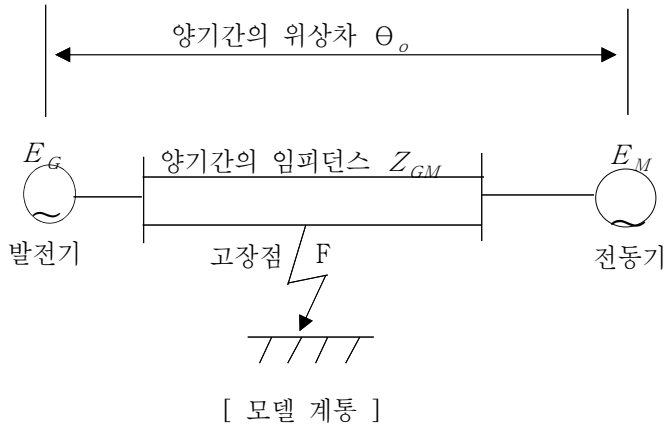
답)

1. 등면적법으로 안정도를 판별하는 방법 설명

1) 정의

2기 계통에서 기계적 입력과 과도내부 전압은 일정하고 제동계수가 0 이라는 가정하에서 고장전, 고장 중, 고장제거 후의 상차각 곡선을 그려 입, 출력 변화를 면적으로 나타내어 과도안정도를 해석하는 기법을 말한다.

2) 안정도 판별



(1) a점: θ_0, P_0 로 2회선 정상운전

기계적 입력과 전기적 출력이 같은점으로 송전전력은 $P_A = \frac{E_G E_M}{Z_{GM}} \sin \theta_o$ 로 된다.

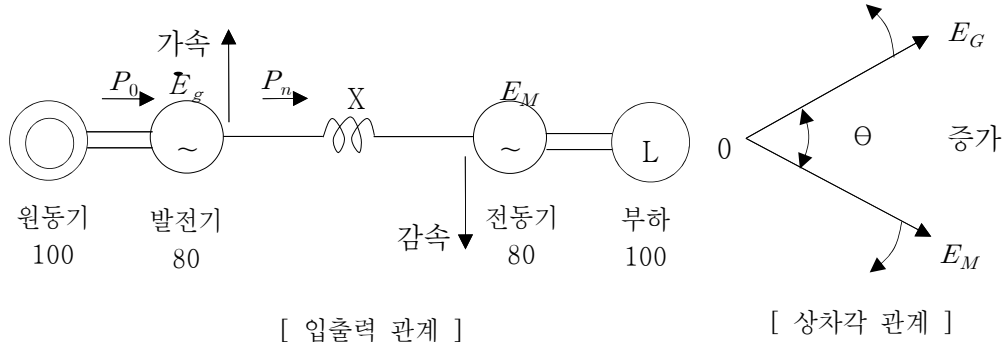
(2) b점: 고장이 발생

1회선이 고장난 상태로 기계적 입력은 일정하지만 전기적 출력이 감소하여 P_B 로 되고 사고가 제거되기 전까지 송전전력은

$$P_A' = \frac{E_G E_M}{Z_{eq}} \sin \theta_F, \quad Z_{eq} : \text{고장중 전달 임피던스} \text{ 된다.}$$

① 발전기: $P_0 - P_B \sin \theta_0$ 만큼 가속

② 전동기: $P_0 - P_B \sin \theta_0$ 만큼 감속



(3) c점: 고장제거

보호계전기 등의 동작으로 사고 제거

(4) e점: 1회선송전

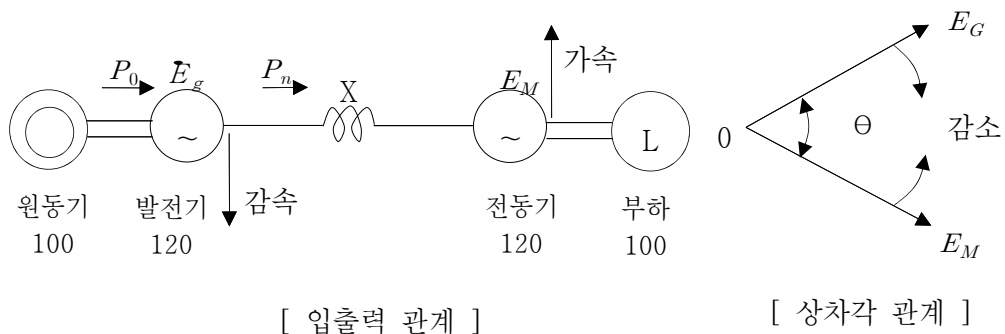
고장이 제거되어 기계적 입력은 일정하지만 전기적 출력이 증가하여 P_C 로 되고 송전전력은

$$P_C = \frac{E_G E_M}{2Z_{GM}} \sin \theta_1 \text{ 이 된다.}$$

① 발전기: $P_C \sin \theta_1 - P_0$ 만큼 감속

② 전동기: $P_C \sin \theta_1 - P_0$ 만큼 가속

③ 발전기는 감속하고 전동기는 가속 하므로 상차각이 줄어야 하지만 회전체의 관성 때문에 상차각이 계속 벌어진다.



(5) f점: 가속면적(A_a : 면적 abcd) = 감속면적(A_d : 면적 defg)이 되는 점

$$\int_{\theta_0}^{\theta_1} (P_0 - P_B \sin \theta) d\theta = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (P_C \sin \theta - P_0) d\theta \quad (\text{발전기 관성에 의해})$$

위상차 각은 감소하여야 하지만 회전체의 관성 때문에 θ_2 까지 벌어진 후 다시 되돌아가는 왕복 진동을 되풀이 하는 동안 제동 작용에 의해 동요가 점차 감쇠되어 안정한 운전 상태로 낙착한다.

(6) h점: 임계점

h점을 넘게 되면 회복력이 마이너스로 되어 가속면적 > 감속면적 돼서 탈조하게 된다.

2. 임계고장 차단시간(critical clearing time)

- 1) 차단시간이 너무 늦어서 가속면적이 감속면적 보다 크게 되면 발전기는 가속 탈조하므로 최대한 빨리 차단하여야 한다.
- 2) 최소한 면적 $abc'd' =$ 면적 $d'e'h$ 되기 전에 차단해야 하는데 이 때의 시간을 임계고장 차단시간이라 한다.

4-6. 양수발전소의 효율은 70% 수준이다. 그럼에도 불구하고 양수발전소를 운영하는 이유를 설명하고, 양수발전소의 경제적 운용(최적 양수(pumping) 및 발전(generation)) 방법에 대하여 설명하시오.

답)

1. 양수발전 운용 이유 설명

1) 첨두부하 공급력의 필요

주야간의 전력소비의 현격한 차이(10:6)로 주간 피크 시 전담 발전 필요

2) 총수요의 증가로 Peak Load 발전력 필요

기저용 발전소(대용량화력, 원자력)의 증가로 계통운용상 전체 계통 용량의 20% 정도의 Peak Load 발전소 필요.

3) 에너지저장

전력 공급의 특성상 공급과 소비가 동시에 이루어지므로 잉여전력을 이용하여 에너지 저장

4) 조상설비 기능(계통 전압의 조정)

동기기는 유도성 부하로서 심야 정부하시에 무효전력을 소비시켜 전압상승을 억제한다.

5) 비첨두시 잉여전력의 활용

6) 전력계통의 신뢰도 향상

계통 광역정전 시 가스터빈과 더불어 시송전 전원 기능이 있고, 전원탈락 시 순동예비력의 역할

7) 발전원가의 절감

전기의 가치를 바꿈으로서 싼 전기를 비싸게 판매한다.

8) 부하변동에 대한 부하 추종성이 우수

계통 병입 시 20 ~ 30분 정도면 병입 되므로 부하추종성이 우수하다.

2. 양수발전소의 경제적 운용 방법에 대하여 설명

1) 국내 양수 발전 운전 패턴

국내 전력계통은 동계와 하계에 대하여 정형화된 양수 운영 패턴을 가지고 있다. 동계에는 주로 주말에 펌핑을 하여 주간에 이를 사용하는 형태이다. 또한, 하계에는 매일 펌핑과 발전을 반복하는 형태이다.

2) 동, 하계 양수 발전의 운전 패턴

먼저 2008년 1월의 평일과 휴일의 가격을 보면, 평일에는 심야에 펌핑하여 주간에 사용하기에 부적절한 가격의 차이를 보인다. 따라서 휴일에 펌핑하여 평일에 사용하는 것이 적절한 운영 패턴이라 할 수 있다.

등계

- 시장가격이 평활하여 주로 주말에 펌핑하여 주중에 상용하는 패턴
- 아래 그림은 2008년 1월의 1주일(월-일)의 시간별 양수 발전 및 펌핑량을 보여줌
- 일요일에 많은 펌핑을 하여 평일에 사용하는 형태임을 알 수 있음

하계

- 밤과 낮의 가격 차이가 커서 매일 펌핑과 발전을 반복함
- 아래 그림은 2008년 8월의 일주일(월-일)의 시간별 양수 발전 및 펌핑량을 보여줌
- 동계에 비해 하계의 발전 및 펌핑량이 많은 것을 알 수 있음

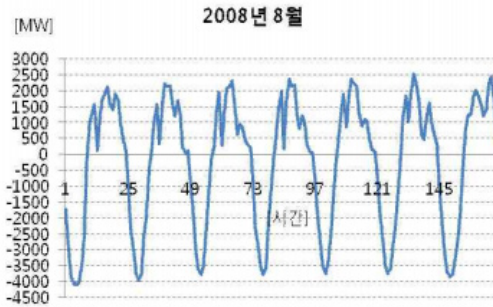
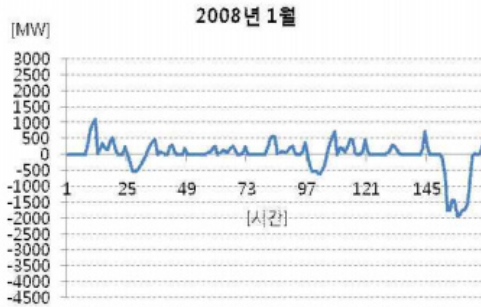


그림 2-4 2008년 양수의 운영 패턴

[2008년 1월 평일 분석]

- 시간별 SMP를 보면 75% 정도의 효율을 갖는 양수발전기가 심야에 펌핑하여 주간에 발전을 할 시간이 거의 없음을 알 수 있음
- 효율이 75%인 양수발전기의 경우 펌핑시의 가격이 90원이면 발전은 $90/0.75 = 120$ 원 이상이 되어야 함
- 성능이 좋은 효율 80% 이상의 양수 발전기의 경우 약간의 펌핑과 발전이 가능한 가격 구조

[2008년 1월 평일/휴일 분석]

- 1월의 평일과 휴일의 가격을 비교하면 휴일에 펌핑하여 평일에 사용하는 것은 적절해 보임
- 1월 휴일의 평균 SMP는 90.48원임. 그러나 휴일에 펌핑으로 인한 수요가 반영되지 않아서 실제의 가격은 이보다 높아야 함.
- 펌핑 수요를 고려한다면 1월의 경우 휴일에도 펌핑할 수 있는 시간은 많지 않아 보임

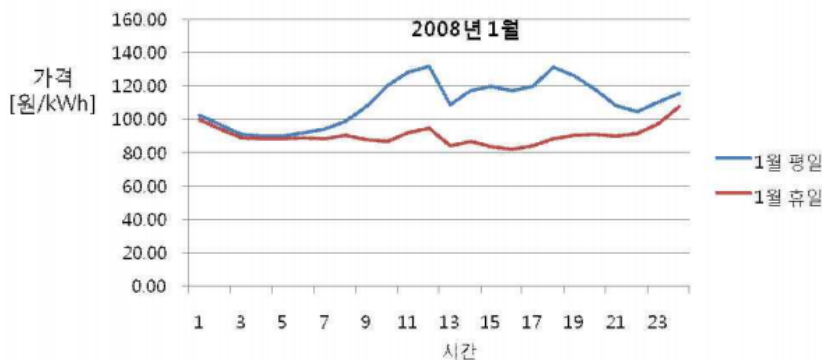


그림 2-5 2008년 1월의 가격

3) 경제양수

- (1) 전력생산 원가가 낮은 발전기가 생산한 전력으로 양수를 실시하고, 전력생산원가가 높은 발전기로 발전해야하는 전력을 양수발전기로 대체하면 전력계통 전체 에너지비용을 절감할 수 있다. 이러한 운영을 경제양수라고 한다.
- (2) 양수발전기 운영을 통해 에너지 비용을 절감하기 위해서는 단기(일일 혹은 주간)부하의 변동 폭이 일정 수준 이상으로 커야 한다.
- (3) 이는 양수 과정에서 에너지의 손실이 발생하므로 양수한 에너지가 대체하게 되는 발전기의 발전비용에 양수발전 종합효율을 곱한 비용이 양수에 필요한 총 에너지 비용보다 커야하기 때문이다. 즉 아래의 조건을 충족할 경우에 경제양수가 가능하다.

$$\text{양수 비용} < \text{대체발전비용} \times \text{양수발전 종합효율}$$

- (4) 경제양수는 일일 혹은 주간 단위로 운영되는 것이 일반적이며 양수를 실시하는 시간과 발전하는 시간의 전력가격 차이가 일정 수준 이상일 경우에 가능하다.

3) SMP를 통한 경제양수 가능성

- (1) 경제양수는 양수비용과 대체발전비용의 비율이 일정 수준 이상일 때 가능하다. 즉, 아래의 조건을 만족할 경우 경제양수가 가능하다.

$$\text{양수 비용} < \text{대체발전비용} \times \text{양수발전 종합효율}$$

- (2) 현재 전력시장 가격은 한계발전기의 변동비에 의해 결정되므로 경제양수 조건은 아래와 같은 식으로 근사될 수 있다.

$$\text{양수 시점의 SMP} < \text{발전 시점의 SMP} \times \text{양수발전 종합효율}$$

- (3) 위 식을 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\text{양수발전 종합효율}} < \frac{\text{발전 시점의 SMP}}{\text{양수 시점의 SMP}}$$

- (4) 위 식 좌변의 양수발전 종합효율을 평균값인 78%로 두었을 때, 1.28의 상수 값을 가진다. 위 식의 우변을 편의상 양수발전의 경제성 계수라고 부르기로 한다. 아래의 식을 만족할 경우 경제양수가 가능한 것으로 볼 수 있다.

$$\text{경제성계수} = \frac{\text{일일 최고 SMP}}{\text{일일 최저 SMP}} > 1.28$$