

제22장 전압.무효전력제어

분류	no.	문제	회수	배점
Q-V콘트롤	1	송전단 전압이 E , 수전단 전압이 V 인 송전선로의 직렬리액턴스가 jx , 수전단에 전달되는 유효전력의 크기를 P 라 할 때 δ 를 V, E, X, P 로 나타내면?	48	10
Q-V콘트롤	2	그림과 같은 1기 무한대 계통에서 발전기에서 공급되는 무효전력 Q 를 구하시오	62	10
Q-V콘트롤	3	조류계산 결과 송전선로 양단의 전압이 다음과 같이 주어 있다. 모선 ①에서 선로를 통하여 전달되는 유효, 무효 전력 계산식은?	61	10
Q-V콘트롤	4	송전계통의 유효전력은 E 와 V 의 위상차에 관계되고, 무효전력은 송전계통의 전압강하에 관계됨을 설명하시오. (단, E : 송전단전압, V : 수전단전압)	93	10
Q-V콘트롤	5	유효전력은 상차각에, 무효전력은 전압강하에 관계됨을 증명하시오.	86	10
Q-V콘트롤	6	E 는 발전기 기전력, V 는 부하 단자전압, $R+jX$ 는 발전기 내부 리액턴스까지 포함한 송전계통의 임피던스이다. 일반적으로 송전계통에서는 $R \ll X$ 가 성립한다. 이러한 경우 송전선상의 유효전력 P 는 E 와 V 의 위상차에, 무효전력 Q 는 송전계통의 전압강하에 밀접하게 관계됨을 벡터도와 수식을 이용하여 설명하시오.	74	25
Q-V콘트롤	7	송전계통에서 유효전력은 상차각에 관계되고, 무효전력은 전압강하에 관계됨을 계통도와 벡터도를 이용하여 증명하시오. (단, 송전계통에서 일반적으로 이다.)	69	25
Q-V콘트롤	8	일반적으로 정상상태의 전력계통에서 유효전력은 위상차()와 밀접하고, 무효전력은 전압크기(V)와 밀접하다고 하는 이유를 다음 그림을 참고하여 수식적으로 설명하시오.	84	25
Q-V콘트롤	9	아래 그림은 발전기, 선로 및 부하로 이루어진 간단한 계통도이다. 부하단 전원과 발전단 전원의 상차각은 δ 이다. 이때 부하에서 공급 받는 유효·무효전력은 다음 식과 같이 유도된다. 이들 식으로부터 이끌어낼 수 있는 사항들을 정리하여 나타내시오. (단, X 는 선로 임피던스임)	89	10
Q-V콘트롤	10	아래 그림과 같이 임피던스 $R+jX [\Omega]$ 의 선로에 $S[VA]=P+jQ$ 의 전력이 송전단에서 공급되고 있다. 선로손실을 P, Q 및 전압의 함수로 유도하시오.	89	10
Q-V콘트롤	11	154[kV] 100[MVA] 기준 임피던스가 $2+j8[\%]$ 인 송전선 수전단에 250[MW]+j50[MVAR]의 조류가 흐를 때, 수전단 운전 전압이 154[kV]라면 이 송전선의 유효 전력 손실 및 무효 전력 손실은 얼마인가?	53	25
Q-V콘트롤	12	역률 0.6(지상), 용량 50[kVA]의 부하가 연결되어 있는 배전선로의 말단에 용량이 20[kVAR]의 커패시터를 병렬로 연결할 때 선로의 손실은 몇 [%]가 감소되는지 구하시오. 단, 부하전압은 일정하다고 가정한다.	63	25
Q-V콘트롤	13	단거리 송전선로의 송수전단간의 전압강하를 유효전력과 무효전력을 사용하여 유도하고, 송전단전압 $V_s=345[kV]$, 선로의 %임피던스가 $2+j10[\%]$ 이고, 부하전력 $P_r=1.0[pu]$, 부하의 역률이 90%일 때 수전단 전압[kV]을 구하시오.	78	25

분류	no.	문제	회수	배점
Q-V콘트롤	14	송전단 전압 V_s 가 345[kV]로 일정하고 수전단 전압이 V_R [kV]이며 송 • 수전단 사이 선로 임피던스가 $R + jx$ [%]인 전력계통에서, 역률 0.8이고 유효전력(PR)이 1.0[pu]인 수전단 부하에 전력을 공급하려고 한다. $R \ll X$ 이고 X 는 10[%]일 때 수전단 전압을 구하시오.	71	25
Q-V콘트롤	15	다음 그림의 송전 선로에 부하를 접속 하였더니 점 D의 전압이 공칭전압 보다 10[kV] 떨어졌다. 원래의 전압으로 회복하는 데 필요한 무효전력량을 구하시오. (단, 그림에서 단위값은 100[MVA]를 기준으로 하였고 저항은 무시한다. D점의 공칭 전압은 200[kV]이다)	84	25
Q-V콘트롤	16	전력계통에서 무효전력의 발생원(發生原)과 소비원(消費原)을 각각 3가지 이상 들고, 과부족이 생겼을 경우의 대책을 열거하라.	44	25
Q-V콘트롤	17	전력계통에서 평상시 계통전압 운용의 문제점과 운용대책에 대하여 설명하시오.	63	25
Q-V콘트롤	18	전력계통에서 전압변동을 급격히 발생시키는 원인 3가지를 열거하시오	44	10
Q-V콘트롤	19	어떤 모선(bus)에서 무효전력 불평형이 전압변동에 어떤 영향을 주는지 Phasor(페이서) 圖(도)를 그려서 설명하라.	48	25
Q-V콘트롤	18	최근 구미 선진국에서 발생하고 있는 대형 정전사고는 무효전력(reactive power) 수급 불균형에 의한 계통의 전압 불안정에 기인하고 국내 계통의 경우도 지속적인 부하의 증가와 송전선의 장거리화 등에 따른 무효전력 손실의 증가로 대형 정전사고 (Black Out)의 위험에 노출되어 있다. 이러한 현상과 관련하여 다음 질문에 답하시오. ① 무효전력이란 무엇인가? ② 무효전력 공급원을 동작 특성에 따라 2가지로 나누어 쓰시오. ③ 무효전력 제어의 어려움을 유효전력(active power)과 비교하여 설명하시오	84	25
Q-V콘트롤	19	최근 수도권 전력수요 급증에 따라 우려되는 전압 불안정 현상의 전력 계통측의 설비적 대책 및 운영 측면 대책을 설명하시오	93	25
Q-V콘트롤	20	용량 1,000[kVA], 자기임피던스가 5[%]인 3상변압기에 800[kVA]의 저항부하(역률 100[%])가 연결되어 있다. 전동기 기동시에 이 변압기 2차모선의 전압변동율을 10[%] 이내로 유지하려면 전동기를 직입기동으로 최대용량은 얼마까지 가능한지 계산하시오. 여기서, 전동기 기동역률 25[%], 기동계급 F급(7.0[kVA/kW]), 변압기 전원측 임피던스는 “0”이고 선로임피던스는 무시하고 임피던스의 저항분은 무시한다.	87	25
Q-V콘트롤	21	용량이 1000[kVA]이고 자기임피던스가 5[%]인 변압기에 역률 100[%]인 기저 부하 750[kVA]가 연결되어 있다. 변압기 2차 모선 전압변동률을 10%로 유지하려면 최대 전동기용량이 얼마일 때까지 직입기동이 가능한지 근거를 제시하여 설명하시오. 이때 전동기 기동역률 40[%], 기동계급은 F급(7.2kVA/kW), 변압기 전원측 임피던스는 Zero 이다.	83	25

[무효 전력과 전압]

1. 전압이 전력계통에 미치는 영향과 전압의 조정

전력계통의 전압은 크기가 공칭전압을 기준으로 일정한 범위 내에서 유지되는 것이 바람직하며 동시에 3상 평형도 이루는 것이 좋다. 만약 전압이 높을 경우에는 전기설비의 수명이 단축되거나 절연파괴를 일으킬 수도 있고, 반대로 전압이 정격전압보다 많이 낮으면 각종 기기들이 제대로 동작을 하지 못할 뿐만 아니라 전류가 증가하여 손실이 증가하고, 과열될 수도 있다.

또한 3상 불평형 상태가 되면 영상분이나 역상분이 발생하여 유도장해 문제나 전기설비에서의 손실 증가 및 역률의 저하를 가져올 수도 있고 또한 발전기의 회전자를 과열시키거나 또는 터빈의 토크를 맥동시킬 수도 있다.

전력계통의 운용에 있어서 기본적인 특성은 소위 $P-Q$ 분할 특성이라 하여 유효전력과 무효전력이 각각 주파수와 전압의 변동에 직접적인 영향을 미친다는 점이지만 전압의 조정이 원활하지 않으면 유효전력 역시 전압의 함수이므로 계통의 주파수 유지에도 악영향을 준다.

이처럼 전압을 일정하게 유지한다는 것은 매우 중요한 문제인데 전압 변동을 가져오는 주 요인은 무효전력의 수급 평형이 이루어지지 않기 때문이다. 그런데 전력계통에 유효전력을 공급할 수 있는 것은 오로지 발전기뿐이지만, 무효전력을 공급할 수 있는 것은 종류가 많다. 발전기 외에 계통의 무효전력을 조절하기 위하여 사용되는 설비를 조상설비(Phase Modifying Equipment) 또는 무효전력 보상장치라고 하며, 동기조상기를 비롯하여 전력용 콘덴서와 분로리액터 그리고 SVC, STATCOM 등의 FACTS 설비가 있다.

특히 계통의 주파수는 전계통적 특성을 갖지만 전압은 국부적 변동 양상을 나타내고 또한 무효전력은 계통을 흐를 때 계통의 정수가 $R \ll X$ 이기 때문에 큰 손실을 동반하므로 전압 변동에 대처하기 위하여 무효전력의 수요 공급을 조절하는 데는 원거리에 있는 발전기에 의존하는 것보다는 각지에 산재해 있는 조상설비를 이용하는 것이 더 유리하다.

이처럼 발전기에 의한 유효전력-주파수($P-f$) 제어와 발전기를 필두로 각종 무효전력 보상장치에 의한 무효전력-전압($Q-V$) 제어가 계통 운용의 기본적인 틀을 이룬다.

2. 전압·무효전력 제어의 필요성

1) 수용가 기기의 전압 특성

(1) 조명

형광등이나 텔레비전은 전압의 변동에 따라 그 밝기가 변화한다. 전압 변동이 계속되면 이 휘도의 변화가 깜박거리게 되어(즉, 플리커 발생) 인간에게 불쾌감을 준다. 조사에 의하면 이 플리커는 전압 변동의 주기가 10[Hz] 정도일 때 가장 심하게 나타난다고 한다.

그림 7-1 (a)는 형광등의 제특성의 변화를 보인 것이다.

(2) 유도 전동기

펌프, 팬 등에 사용되는 유도 전동기에서는 전압이 변화하면 토크, 슬립, 전부하 전류 등의 제특성이 영향을 받아 회전 속도에 변화가 생기거나 과부하 운전이 되기도 한다. 또, 전압 강하는 전부하 전류를 증대시켜 전동기를 가열할 우려도 있다.

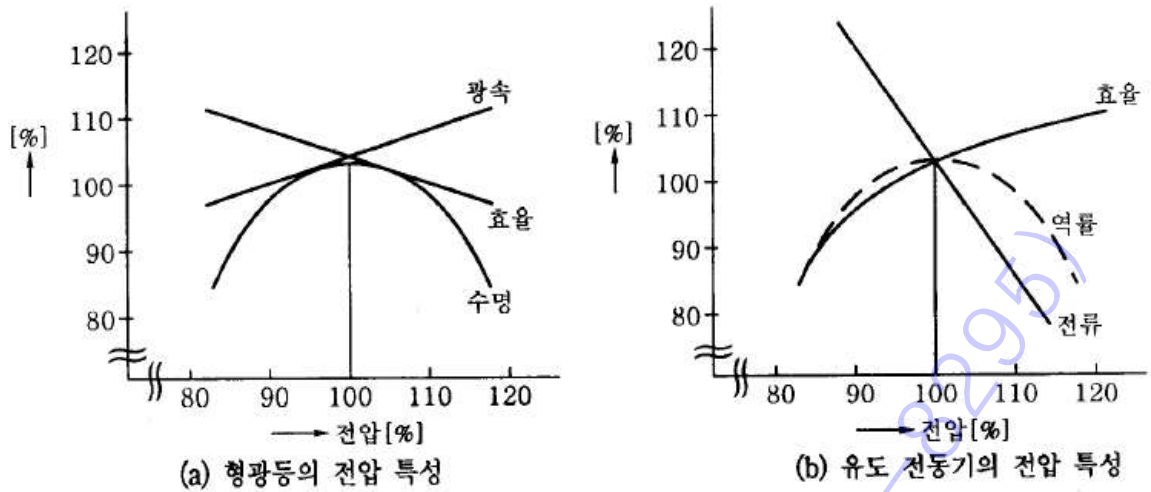


그림 7-1 전기 기기의 전압 특성

(3) 컴퓨터 및 전자 기기

근래 눈부신 발전을 거듭하면서 널리 보급되고 있는 컴퓨터 및 일렉트로닉스 기기는 워낙 그 특성이 예민하기 때문에 극히 작은 전압 변동에 대해서도 민감하게 반응해서 연산 오차를 발생하거나 성능을 저하시킨다.

이것은 특히 순시 전압 강하 문제라고 해서 최근에 많은 관심을 끌고 있는 것이다.

2) 전압 제어의 필요성

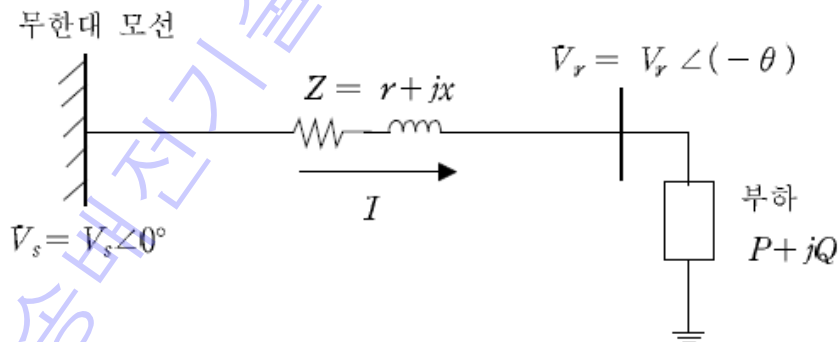
(1) 전압의 저하가 심할 경우

- 1) 유효 전력 손실의 증가
- 2) 송·변전 설비의 전류 용량에 의한 송전 용량의 저하
- 3) 정태 안정도에 의한 송전 용량의 저하
- 4) 발전소 출력의 저하

(2) 전압이 너무 높을 경우

- 1) 전력용 기기의 열화 촉진
- 2) 고조파의 발생

3. 전압과 무효전력의 기본 특성



$$\begin{aligned}
 1) \quad W_r = P + jQ &= V_r I^* = V_r \left(\frac{V_s - V_r}{r + jx} \right)^* \\
 &= V_r \angle (-\theta) \times \frac{V_s - V_r \angle \theta}{r - jx} \\
 &= \frac{V_s V_r \angle (-\theta) - V_r^2}{r - jx}
 \end{aligned}$$

$$(r-jx)(P+jQ) = V_s V_r \angle(-\theta) - V_r^2$$

$$\therefore rP + xQ + V_r^2 = V_s V_r \cos \theta$$

$$xP - rQ = V_s V_r \sin \theta$$

$$\text{또는 } (rP + xQ + V_r^2)^2 + (xP - rQ)^2 = V_s^2 V_r^2 \quad \text{--- 식 ㉑}$$

2) 식 ㉑의 유효전력 P 에 대한 全微分은 다음과 같다.

$$\frac{\partial V_r}{\partial P} = 2(rP + xQ + V_r^2) \cdot (r + 2V_r \frac{\partial V_r}{\partial P}) + 2(xP - rQ) \cdot x = 2V_s^2 V_r \frac{\partial V_r}{\partial P}$$

위 식을 전개해서 정리하면

$$r^2 P + rxQ + rV_r^2 + 2V_r \frac{\partial V_r}{\partial P} (rP + xQ + V_r^2) + x^2 P - rxQ = V_s^2 V_r \frac{\partial V_r}{\partial P}$$

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial P} (2rP + 2xQ + 2V_r^2 - V_s^2) = -(r^2 P + x^2 P + rV_r^2) = -(z^2 P + rV_r^2)$$

$$\therefore \frac{\partial V_r}{\partial P} = -\frac{z^2 P + rV_r^2}{V_r (2rP + 2xQ + 2V_r^2 - V_s^2)} \quad \text{--- 식 ㉒}$$

3) 결국 유효전력 P 에 대한 전압의 변화량 ΔV_r 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V_r = \frac{\partial V_r}{\partial P} \times \Delta P = -\frac{z^2 P + rV_r^2}{V_r (2rP + 2xQ + 2V_r^2 - V_s^2)} \Delta P \quad \text{--- 식 ㉓}$$

4) 마찬가지로 식 ㉑의 무효전력 Q 에 대한 전미분을 구하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial V_r}{\partial Q} = -\frac{z^2 Q + xV_r^2}{V_r (2rP + 2xQ + 2V_r^2 - V_s^2)} \quad \text{--- 식 ㉔}$$

5) 무효전력 Q 에 대한 전압의 변화량 ΔV_r 은 다음과 같다.

$$\Delta V_r = \frac{\partial V_r}{\partial Q} \times \Delta Q = -\frac{z^2 Q + xV_r^2}{V_r (2rP + 2xQ + 2V_r^2 - V_s^2)} \Delta Q \quad \text{--- 식 ㉕}$$

6) 앞의 두 식 ㉒와 ㉔를 비교하면 전압의 변동 ΔV_r 에 미치는 유효전력 및 무효전력의 상대적인 영향을 알 수 있다.

$$\rho = \frac{\text{유효전력의 변화에 의한 전압의 변동}}{\text{무효전력의 변화에 의한 전압의 변동}} = \frac{\partial V_r / \partial P}{\partial V_r / \partial Q}$$

$$= \frac{z^2 P + rV_r^2}{z^2 Q + xV_r^2} = \frac{zP + r \frac{V_r^2}{z}}{zQ + x \frac{V_r^2}{z}} = \frac{zP + rC}{zQ + xC}$$

여기서 $C = \frac{V_r^2}{z}$ 는 수전단에서 선로측 즉, 전원측을 바라본 계통 단락용량이므로 일반적으로 부하의 크기 P 또는 Q 보다는 훨씬 더 크다.

따라서 $C \gg P$ 및 $C \gg Q$ 이고,

송전선로의 일반적인 조건도 $x \gg r$ 이므로 $z \approx x$ 로 둘 수 있다.

$$\therefore \rho = \frac{zP + rC}{zQ + xC} \approx \frac{zP + rC}{xC} = \frac{z}{x} \cdot \frac{P}{C} + \frac{r}{x} \approx \frac{P}{C} \ll 1$$

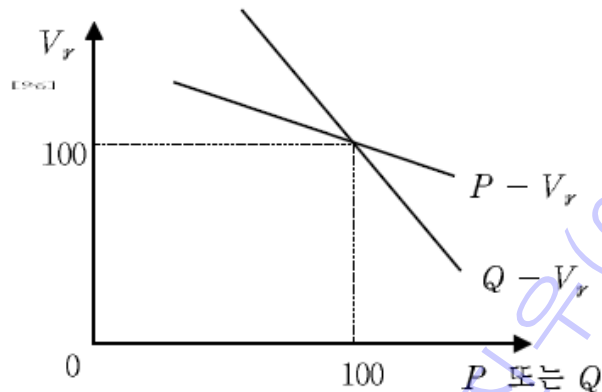
즉, 전압의 변동 ΔV_r 에 미치는 유효전력의 영향은 무효전력의 영향에 비하

여 마치 부하 전력의 계통 단락용량에 대한 비(P/C)와 비슷할 정도로 작다는 것을 의미한다.

그리고 단락용량에 비해서 경부하인 송전선일수록 무효전력의 변동이 전압 변동에 미치는 영향이 압도적으로 크다는 것도 알 수 있다.

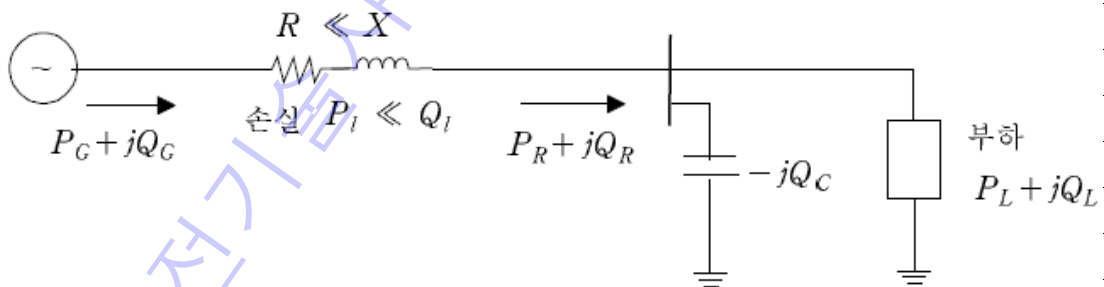
- 7) 한편 앞의 두 식 ㉔와 ㉕의 우변의 ΔP 및 ΔQ 의 계수의 부호가 마이너스이므로 유효전력과 무효전력(유도성)이 증가($\Delta P > 0$, $\Delta Q > 0$)하면 전압은 강하($\Delta V_r < 0$)하게 된다는 것을 의미한다.

이때 두 식의 계수를 비교해 보면 분모는 같고, 분자는 무효전력에 대한 전압의 변화율($\frac{\partial V_r}{\partial Q}$)인 식 ㉔ 분자($z^2 Q + x V_r^2$)가 유효전력에 대한 전압의 변화율($\frac{\partial V_r}{\partial P}$)을 나타내는 식 ㉕의 분자($z^2 P + r V_r^2$)보다 더 크므로 다음과 같은 기울기를 갖는 그래프로 표현할 수가 있다.



즉, 이 그래프를 통해서도 무효전력의 변동이 전압의 변동에 훨씬 더 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수가 있다.

· 계통의 무효전력 수급



-유효전력의 수급 : $P_I \ll P_L$

$$\therefore P_G = P_I + P_L \approx P_L$$

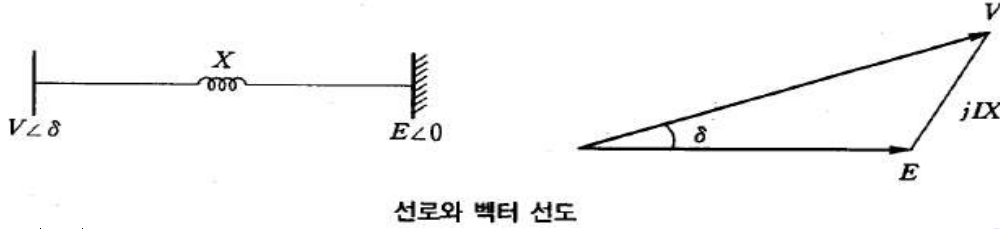
-무효전력의 수급 : $Q_I \approx Q_L$

$$\therefore Q_G + Q_C = Q_I + Q_L \approx 2Q_L$$

$$= 2 \times (0.6 \sim 1.0) P_L = 1.2 P_L \sim 2.0 P_L$$

[송전단 전압이 $V\angle\delta$, 수전단 전압이 $E\angle 0$ 인 송전선로의 직렬리액턴스가 jX , 수전단에 전달되는 유효전력의 크기를 P 라 할 때 δ 를 V, E, X, P 로 나타내면?]

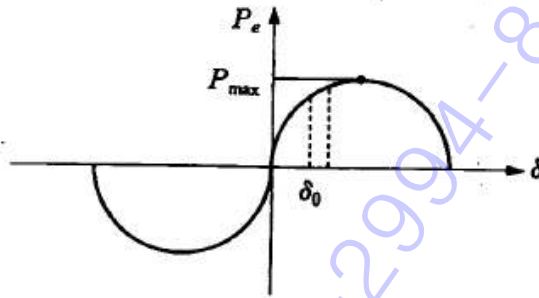
1. 문제의 조건을 그림으로 표현



2. 유효전력 표현식

$$P = \frac{V \cdot E}{X} \sin \delta$$

3. 전력(P)-상차각(δ) 특성 곡선

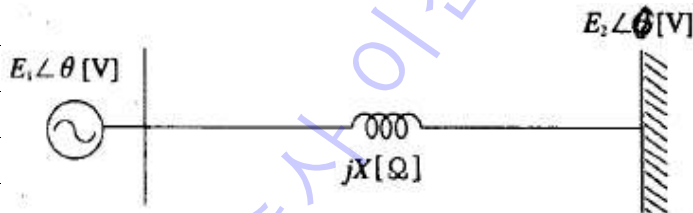


그림에서 $\delta=0$ 일 때 유효 전력 $P_e=0$ 이고, $\delta=90^\circ$ 일 때 유효 전력 $P_e = \frac{V \cdot E}{X}$ 로서 최대가 되며, 이것을 정태 안정 극한 전력이라 한다.

즉, 전압 V, E 를 증가시키든지 X 를 감소시키면 최대 전력은 증가된다.

그리고, 전압 V, E 를 일정하다고 하면, 전력은 $\sin \delta$ 에 비례한다.

[그림과 같은 1기 무한대 계통에서 발전기에서 공급되는 무효전력 Q 를 구하시오]



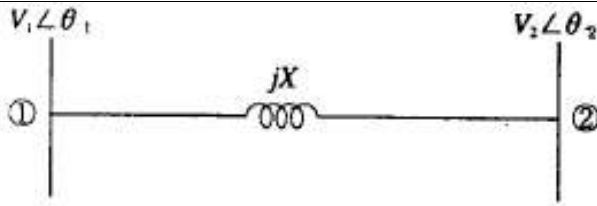
$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 + jX \cdot I$$

$$I = \frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{jX}$$

발전기에서 공급되는 유효·무효 전력을 P, Q 라 하면

$$\begin{aligned} P + jQ &= \dot{E}_1 \dot{I}^* = \dot{E}_1 \cdot \left(\frac{\dot{E}_1 - \dot{E}_2}{jX} \right)^* \\ &= \dot{E}_1 \cdot \frac{\dot{E}_1^* - \dot{E}_2^*}{-jX} = j \left\{ \frac{E_1^2 - \dot{E}_1 \cdot \dot{E}_2^*}{X} \right\} \\ &= j \frac{E_1^2 - E_1(\cos \theta + j \sin \theta)E_2}{X} \\ &= j \frac{E_1^2 - E_1 E_2 \cos \theta - j E_1 E_2 \sin \theta}{X} \\ &= \frac{E_1 E_2 \sin \theta + j(E_1^2 - E_1 E_2 \cos \theta)}{X} \\ \therefore Q &= \frac{E_1^2 - E_1 E_2 \cos \theta}{X} \end{aligned}$$

[조류계산 결과 송전선로 양단의 전압이 다음과 같이 주어져 있다. 모선 ①에서 선로를 통하여 전달되는 유효, 무효 전력 계산식은?]



$$\dot{V}_1 = V_1 \angle \theta_1 \quad \dot{V}_2 = V_2 \angle \theta_2$$

전류 I 라 하면

$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 + jXI$$

$$I = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{jX}$$

$$P + jQ = \dot{V}_1 I^* = \dot{V}_1 \cdot \left(-\frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{jX} \right)^*$$

$$= \frac{\dot{V}_1 \dot{V}_1^* - \dot{V}_1 \dot{V}_2^*}{(jX)^*} = \frac{V_1^2 - \dot{V}_1 \dot{V}_2^*}{-jX}$$

$$= j \frac{V_1^2 - (V_1 \angle \theta_1 \cdot V_2 \angle -\theta_2)}{X}$$

$$= j \frac{V_1^2 - [V_1 (\cos \theta_1 + j \sin \theta_1) \cdot V_2 (\cos \theta_2 - j \sin \theta_2)]}{X}$$

$$= j \frac{1}{X} [V_1^2 - \{V_1 V_2 (\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2) + j V_1 V_2 (\sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 - \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2)\}]$$

여기서 $\sin(\theta_1 \pm \theta_2) = \sin \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \pm \cos \theta_1 \cdot \sin \theta_2$

$$\cos(\theta_1 \pm \theta_2) = \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2 \mp \sin \theta_1 \cdot \sin \theta_2$$

이므로

$$\therefore P + jQ = j \frac{1}{X} [V_1^2 - \{V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) + j V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)\}]$$

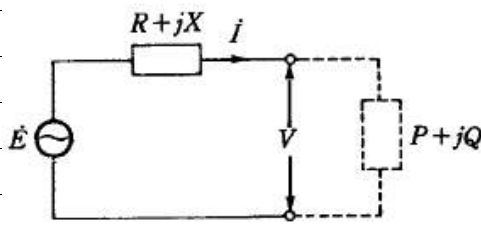
$$= \frac{V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{X} + j \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{X}$$

따라서

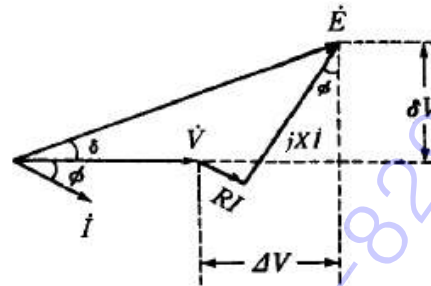
$$\text{유효전력 } P = \frac{V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{X}$$

$$\text{무효전력 } Q = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{X}$$

[E는 발전기 기전력, V는 부하 단자전압, $R+jX$ 는 발전기 내부 리액턴스까지 포함한 송전계통의 임피던스이다. 일반적으로 송전계통에서는 $R \ll X$ 가 성립한다. 이러한 경우 송전선상의 유효전력 P는 E와 V의 위상차에, 무효전력 Q는 송전계통의 전압강하에 밀접하게 관계됨을 벡터도와 수식을 이용하여 설명하시오.]



(a) 계통도



(b) 벡터도

단상 송전 계통

부하 전력의 역률각을 ϕ 라 하면 $\vec{V}$, $\vec{E}$ 및 $\vec{I}$ 의 벡터도는 그림 (b)처럼 된다. 이 그림으로부터

$$\begin{aligned} E^2 &= (V + RI \cos \phi + XI \sin \phi)^2 + (XI \cos \phi - RI \sin \phi)^2 \\ &= \left(V + \frac{VI \cos \phi \cdot R + VI \sin \phi \cdot X}{V} \right)^2 + \left(\frac{VI \cos \phi \cdot X - VI \sin \phi \cdot R}{V} \right)^2 \\ &= \left(V + \frac{RP}{V} + \frac{XQ}{V} \right)^2 + \left(\frac{XP}{V} - \frac{RQ}{V} \right)^2 \\ &= (V + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 \end{aligned}$$

로 된다. 여기서

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}, \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V}$$

송전 계통에서는 $\delta V \ll V + \Delta V$, $R \ll X$ 가 성립하므로

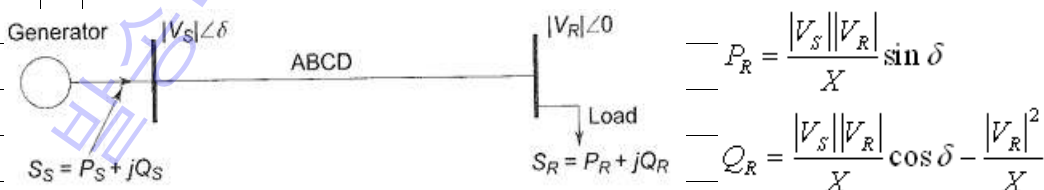
$$Q \approx \frac{V}{X} \Delta V \approx \frac{V}{X} (E - V)$$

$$P \approx \frac{V}{X} \delta V = \frac{VE \sin \delta}{X}$$

로 되어 Q는 전압 강하(E - V)에, P는 $\sin \delta$ 에 비례함을 알 수 있다.

[아래 그림은 발전기, 선로 및 부하로 이루어진 간단한 계통도이다. 부하단 전원과 발전단 전원의 상차각은 δ 이다. 이때 부하에서 공급 받는 유효·무효전력은 다음 식과 같이 유도된다. 이들 식으로부터 이끌어낼 수 있는 사항들을 정리하여 나타내시오.

(단, X는 선로 임피던스임)]



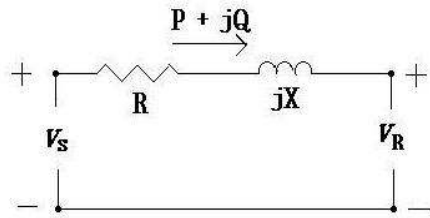
$$P_R = \frac{|V_S| |V_R|}{X} \sin \delta$$

$$Q_R = \frac{|V_S| |V_R|}{X} \cos \delta - \frac{|V_R|^2}{X}$$

$$P_R + jQ_R = V_R \cdot I^* = V_R \cdot \{(V_S - V_R) / X\}^*$$

위식을 풀면 된다.

[아래 그림과 같이 임피던스 $R+jX$ [Ω]의 선로에 $S[VA]=P+jQ$ 의 전력이 송전단에서 공급되고 있다. 선로손실을 P , Q 및 전압의 함수로 유도하시오.]



$$P+jQ = VI^*$$

$$I^* = \frac{P+jQ}{V} = \frac{\sqrt{P^2+Q^2}}{V}$$

따라서

$$P_L = I^2 R = \frac{R(P^2+Q^2)}{V^2}$$

$$Q_L = I^2 X = \frac{X(P^2+Q^2)}{V^2}$$

154[kV] 100[MVA] 기준 임피던스가 $2+j8$ [%]인 송전선 수전단에 250[MW]+
 $j50$ [MVAR]의 조류가 흐를 때, 수전단 운전 전압이 154[kV]라면 이 송전선의 유효
 전력 손실 및 무효 전력 손실은 얼마인가?

$$V=1.0 \text{ [PU]}, R=0.02 \text{ [PU]}, X=0.08 \text{ [PU]}, P=2.5 \text{ [PU]}$$

$$Q=0.5 \text{ [PU] 이므로}$$

유효 전력 손실은

$$\begin{aligned} P_L &= \frac{R \cdot (P^2 + Q^2)}{V^2} \\ &= \frac{0.02(2.5^2 + 0.5^2)}{1.0^2} = 0.13 \text{ [PU]} \end{aligned}$$

$$P_L = 0.13 \times 100 = 13 \text{ [MW]}$$

무효 전력 손실은

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{X(P^2 + Q^2)}{V^2} \\ &= \frac{0.08(2.5^2 + 0.5^2)}{1.0^2} = 0.52 \text{ [PU]} \end{aligned}$$

$$Q_L = 0.52 \times 100 = 52 \text{ [MVAR]}$$

역률 0.6(지상), 용량 50[kVA]의 부하가 연결되어 있는 배전선로의 말단에 용량이 20[kVAR]의 커패시터를 병렬로 연결할 때 선로의 손실은 몇 [%]가 감소되는지 구하시오. 단, 부하전압은 일정하다고 가정한다.

$$\text{선로손실 } L = 3(I^2 R)$$

여기서, I : 부하전류 [A]

R : 배전선로의 1가닥의 저항 [Ω]

또, 부하의 유효, 무효전력 P, Q 는

$$P[\text{kW}] = \sqrt{3} VI \cos \theta \times 10^{-3}$$

$$Q[\text{kVAR}] = \sqrt{3} VI \sin \theta \times 10^{-3}$$

여기서, V : 수전단전압을 나타낸다.

따라서, 피상전력은 $W = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$$(\sqrt{3} VI)^2 = P^2 + Q^2$$

$$I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{3V^2}$$

$$L = 3 \left(\frac{P^2 + Q^2}{3V^2} \right) R = \frac{R(P^2 + Q^2)}{V^2}$$

커패시터 설치 전의 전력 손실 L_1 은

$$L_1 = \frac{R}{V^2} (30^2 + 40^2)$$

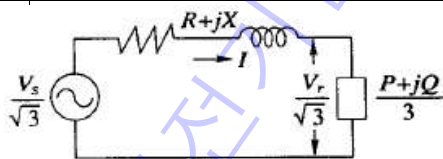
커패시터 설치 후의 전력 손실 L_2 은

$$L_2 = \frac{R}{V^2} [30^2 + (40 - 20)^2]$$

$$L_2 = \frac{1300}{2500} L_1 = 0.52 L_1$$

커패시터 설치 후의 전력 손실 L_2 은 52[%]로 줄어든다.

[단거리 송전선로의 송수전단간의 전압강하를 유효전력과 무효전력을 사용하여 유도하고, 송전단전압 $V_s=345[\text{kV}]$, 선로의 %임피던스가 $2+j10[\%]$ 이고, 부하전력 $P_r=1.0[\text{pu}]$, 부하의 역률이 90%일 때 수전단 전압[kV]을 구하시오.]



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

$$= \frac{1}{V_r} [\sqrt{3} V_r I R \cos \theta + \sqrt{3} V_r I X \sin \theta]$$

$$= \frac{PR + XQ}{V_r}$$

$$\therefore \Delta V = \frac{\Delta V}{V_r} = \frac{RP + XQ}{V_r^2}$$

%로 표시하면 ($V_r^2 = 1.0[\text{PU}]$)

$$\Delta V = \%RP + \%XQ[\%] \approx \%XQ \quad [\because R \ll X]$$

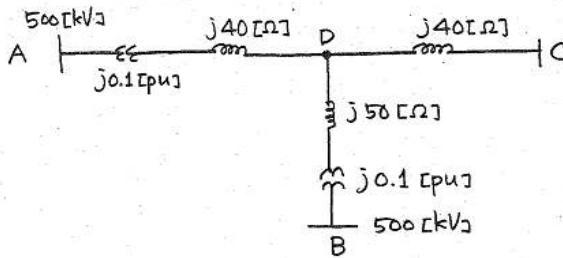
$$\text{피상전력 } P_a = 1.0 / 0.9 = 1.11 [\text{PU}]$$

$$\text{무효전력 } Q = P_a \sin \theta = 1.11 * 0.436 = 0.4844 [\text{PU}]$$

$$\Delta V = 0.02 * 1.0 + 0.1 * 0.4844 = 0.06844 [\text{PU}]$$

$$V_R = V_S - \Delta V = (1.0 - 0.06844) * 345 \text{KV} = 321.4 [\text{KV}]$$

[다음 그림의 송전 선로에 부하를 접속 하였더니 점 D의 전압이 공칭전압 보다 10[kV] 떨어졌다. 원래의 전압으로 회복하는 데 필요한 무효전력량을 구하시오. (단, 그림에서 단위값은 100[MVA]를 기준으로 하였고 저항은 무시한다. D점의 공칭 전압은 200[kV]이다)]



200KV 회로의 리액턴스 기준값은

$$(200 * 10^3)^2 / 100 * 10^6 = 400 [\Omega]$$

선로의 리액턴스 단위값은

$$j40 / 400 = j0.1 [\text{PU}]$$

$$j50 / 400 = j0.125 [\text{PU}]$$

D 점을 기준으로 A,B,C 선로가 병렬이므로 합성 리액턴스는

$$1 / (1/0.2 + 1/0.1 + 1/0.225) = 0.0657 [\text{PU}]$$

D 점에서 3상 단락 용량은

$$100 / 0.0657 = 1,522 [\text{MVA}]$$

$$\Delta V = Q_c / R_c \text{ 이므로 } Q_c = \Delta V * R_c$$

$$Q_c = (10/200) * 1,522 = 76.1 [\text{MVar}]$$

[참조]

$$\Delta V = \frac{Q_c}{R_c} \times 100 \text{의 식 유도}$$

$$\Delta E = I(R \cos \theta_0 + X \sin \theta_0) = \frac{P_r}{E_r} (R + X \tan \theta_0)$$

이때 수전단에 부하와 병렬로 콘덴서를 설치해서 역률을 $\cos \theta_1$ 으로 개선한 후의 전압강하 $\Delta E'$ 는 유효 전류가 변하지 않는다고 가정하면

$$\Delta E' = \frac{P_r}{E_r} (R + X \tan \theta_1)$$

으로 될 것이다. 비교하면

$$\Delta E - \Delta E' = \frac{X P_r}{E_r} (\tan \theta_0 - \tan \theta_1)$$

로 되며 $\tan \theta_0 > \tan \theta_1$ 이므로 $\Delta E > \Delta E'$ 로 된다.

$$\frac{\Delta E - \Delta E'}{E_r} \times 100 = \frac{X P_r}{E_r^2} (\tan \theta_0 - \tan \theta_1) \times 100$$

$$= \frac{X}{E_r^2} P_r (\tan \theta_0 - \tan \theta_1) \times 100$$

$$\cong \frac{Q_c}{R_c} \times 100 [\%]$$

$$R_c \cong \frac{E_r^2}{X} \text{ 콘덴서 설치 모선의 단락 용량}$$

$$Q_c = P_r (\tan \theta_0 - \tan \theta_1)$$

[전력계통에서 무효전력의 발생원(發生原)과 소비원(消費原)을 각각 3가지 이상들고, 과부족이 생겼을 경우의 대책을 열거하라.]

1. 무효전력 발생원과 소비원

발생원	소비원
1) 정의 : 진상무효전력을 공급하는 것	지상무효전력을 공급하는 것
(1) 지상운전시의 발전기(과여자)	(1) 진상운전시의 발전기(저여자 운전)
(2) 진상운전시의 동기조상기	(2) 지상운전시의 동기조상기
(3) 충전용량이 큰 송배전선 (장거리 T/L과 지중 cable)	(3) 송배전선 및 변압기에 있어서의 리액터스
(4) 전력용 condenser(SC)	(4) 분로리액터
(5) SVC, STATCON	(5) SVC, STATCON
(6) 진상부하(역률개선용 콘덴서와 과보상분)	(6) 지상부하

2. 무효전력 과부족시 문제점 대책

구 분	진상무효전력 부족시(발생 < 소비)	진상무효전력 공급과잉시(발생 > 소비)
문제점	① 계통전압의 이상저하 ② 송전손실 증가 ③ 계통의 안정도 저하 : 전압의 변동과 무효 전력 조류의 불필요한 이동으로 계통의 안정도 저하 ④ 기기의 효율 저하 및 전기품질 저하	① 계통전압의 이상 상승 ② 전압상승에 따른 계통연계 기기의 수명 저하 ③ 기기 열화 촉진 ④ 무효분(진상)이 많아 고조파 발생장해가 우려됨
대 책	① 발전기의 과여자 운전 ② 동기조상기의 진상운전 ③ 전력용 콘덴서 투입 ④ 무효전력 소비량 감소 ⑤ 역률이 높은 기기를 사용하고 역률개선용 콘덴서 사용(수용가) ⑥ SVC 또는 STATCON 적용 자동조정	① 발전기의 저여자 운전 ② 동기조상기의 지상운전 ③ 분로리액터 투입(sh.R) ④ 역률개선용 콘덴서 개방(수용가) ⑤ 선로충전용량을 감소시킴 (신뢰도상 지장없는 초고압 T/L 및 지 중 T/L 등의 정지)

3. 무효전력 제어방식(Q-V 제어)의 적절한 운용

1) 개별제어(I)

- (1) 각 발전소 단위의 전압유지가 목적임
- (2) 발전소의 AVR 운전, 변전소의 LRC 자동조작, 조상설비의 시간 스케줄 조작에 의함

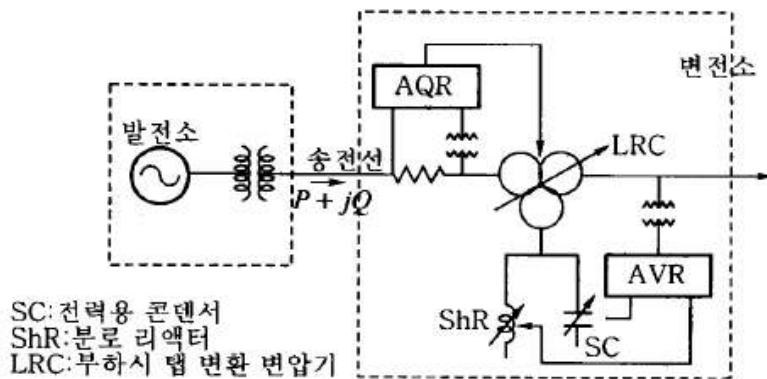
2) 개별제어(II)

- (1) 발전소의 일부 또는 전부를 무효전력조정기(AQR)에 의한 제어
- (2) 단거리 소용량 T/L에 적용

3) 개별제어(III)

- (1) 장거리, 중거리 T/L의 조류제어 방법으로 전압, 무효전력의 변화에 따라 선택제어

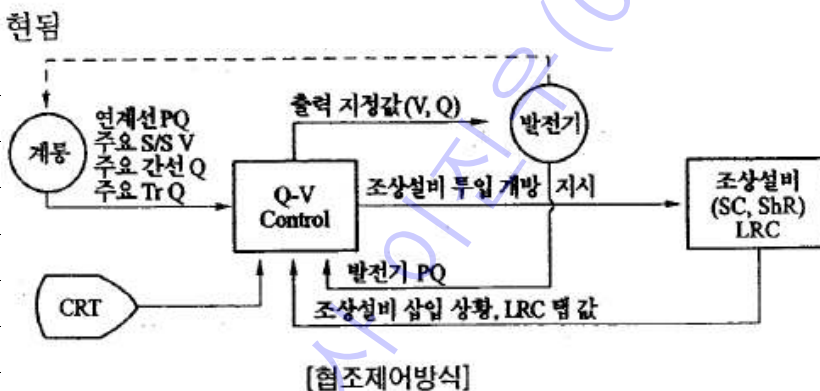
- (2) 변전소가 중심인 조류제어 방식으로 변전소의 역률을 높게하여 (0.85~0.9 정도) 초고압 S/S에서 효과가 크다.
- (3) 변전소 내 조상설비를 완전자동화 및 LRC 조합제어방식



개별 제어 시스템의 일례

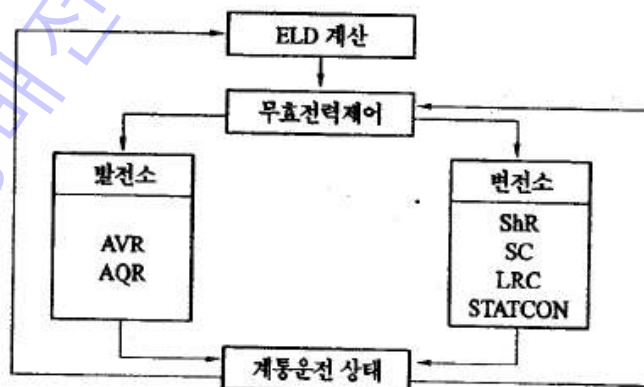
4) 협조제어방식

- (1) 가깝게 인접한 발변전소 간의 개별제어 방식을 서로 협조시키는 방식
- (2) 개별제어방식(III) + 화력발전소의 무효전력을 협조시키는 방법
- (3) 계통 내 주요 S/S 단위로 각각 실시하면 부분계통마다의 적정 운전이 실현됨



5) 종합제어방식

다수의 발변전소를 포함한 광범위한 계통을 일괄해서 협조 제어시키는 방식이다.



[전력계통에서 평상시 계통전압 운용의 문제점과 운용대책에 대하여 설명하시오.]

1. 평상시 계통 전압 운용의 문제점

(1) 전압의 저하가 심할 경우

- 1) 유효 전력 손실의 증가
- 2) 송·변전 설비의 전류 용량에 의한 송전 용량의 저하
- 3) 정태 안정도에 의한 송전 용량의 저하
- 4) 발전소 출력의 저하

(2) 전압이 너무 높을 경우

- 1) 전력용 기기의 열화 촉진
- 2) 고조파의 발생

2. 계통 전압 운용상 나타난 문제점에 대한 운용 대책

1) 전기 품질 유지를 위한 전압 조정 목표의 준수

(1) 345KV 계통 → 353KV[336 ~ 360KV]

(2) 154KV 계통

(1) 중부하시 : 160KV ± 4KV

(2) 부하변동시 : 157KV ± 4KV

(3) 경부하시 : 156KV ± 4KV

(3) 22.9KV 계통

(1) 침두부하시 : 23.9KV

(2) 중부하시 : 22.9KV

(3) 경부하시 : 22.0KV

2) 전압 유지 범위를 전력 거래소 및 전기 사업자는 준수 할 것

(1) 13.2/22.9KV → 12~13.8/20~23.8KV

(2) 154KV → 154KV ± 10% [139 ~ 169KV]

(3) 345KV → 345KV ± 5% [328 ~ 362KV]

3) 조상 설비를 통한 계통 전압의 조정

설치장소	종류	역할	조정기능
발전소	동기 조상기	송전계통의 전압 조정 및 역률 개선	전압상승시(발생>소비) : 저여자 운전 전압저하시(발생<소비) : 과여자 운전
	AVR		
변전소	Sh,R	경부하시 전압 및 역률 개선	전압상승시(발생>소비) : Sh,R 투입
	S,C	중부하시 전압 및 역률 개선	전압저하시(발생<소비) : S,C투입, Sh,R개방
	SVC, STATCOM	전압 및 역률 개선	전압 상승 및 저하시 모두 적용
배전선로	배전용 콘덴서	중부하시 전압 및 역률 개선	전압저하시(발생<소비) : 콘덴서 투입
	승압기	전압 개선	전압저하시 : 탭 조정 전압 상승

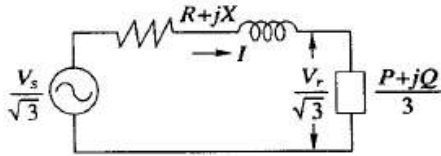
3. 조상설비의 조합을 통한 Q-V 제어 방식의 적절한 운용

상기 문제 참조

[어떤 모선(bus)에서 무효전력 불평형이 전압변동에 어떤 영향을 주는지

Phasor(페이서) 圖(도)를 그려서 설명하라.]

1. 무효전력과 전압과의 관계



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

$$= \frac{1}{V_r} [\sqrt{3} V_r I R \cos \theta + \sqrt{3} V_r I X \sin \theta]$$

$$= \frac{PR + XQ}{V_r}$$

$$\therefore \Delta V = \frac{\Delta V}{V_r} = \frac{RP + XQ}{V_r^2}$$

%로 표시하면($V_r = 1.0[\text{PU}]$)

$$\Delta V = \%RP + \%XQ[\%] \approx \%XQ \quad [\because R \ll X]$$

2. 무효전력 불평형이 전압 변동에 주는 영향

1) 무효전력 과부족에 의한 전압 붕괴 현상 유발

(1) 전압 붕괴 현상

ㄱ) 선로의 조류 증가로 수전단 전압 강하

ㄴ) 정전력 부하의 영향으로 선로 조류는 더욱 증가

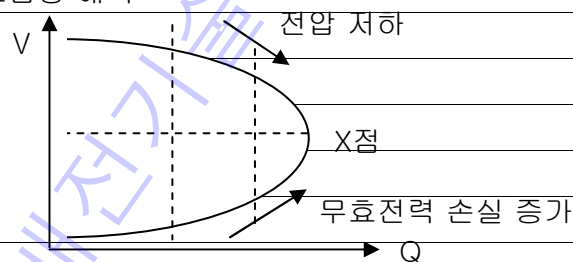
ㄷ) 이때 선로 조류의 제공배 비례한 유효 전력 손실 증가, 수전단 전압 더욱 저하

ㄹ) 계통 붕괴

(2) 무효전력 손실과 전압의 관계

ㄱ) 무효 전력 증가 → 전압 저하 → 무효전력 손실 증가

ㄴ) 그림상 해석



가) X점 부근에서 전압이 급격히 감소 → 무효전력 손실 급격히 증가

나) 무효전력 증가에 의한 전압 붕괴현상은 전압강하, 필요한 무효전력 증가, 손실의 증가의 악순환이 반복되어서 발생된다.

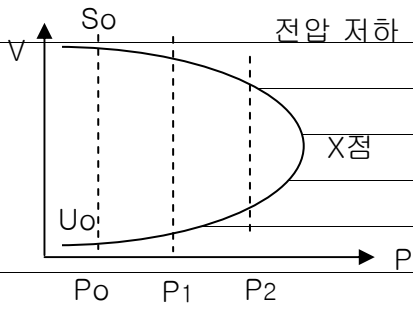
2) 유도 전동기에 의한 전압 악화 현상 발생 → 무효전력 과부족의 영향

(1) 유도 전동기의 일정 토크의 경우 상기 그림과 같이 V_s , V_R 은 일정하므로 아래 그림의

P-V 선도 특성곡선으로 전압 안정 부분을 해석 할 수있다.

(2) 부하 전력 P_0 인 점에서 두 개의 운전점 S_0 , U_0 가 유지 된다.

(3) 유도 전동기 부하가 증가하여도 공급되는 전력 P_0 는 직접 변하지 않아 공급에너지 부족 현상이 발생되면, 전동기 회전수가 감소하여 $N_s = N(1-S) \rightarrow$ 슬립토크의 증가 → 상차각

		δ의 증가
		(4) 이와같은 악 순환 반복으로 시스템 불안정
		(5) 따라서 수전단 전압이 안정되기 위한 조건은 $dV/dP < 0$ 이어야 한다.
		
		3) 무부하 송전선로의 페란티 현상(무효전력 과다가 주 원인)
		(1) 페란티 현상
		(2) 자기여자 현상
		[용량 1,000[kVA], 자기임피던스가 5[%]인 3상변압기에 800[kVA]의 저항부하(역율 100[%])가 연결되어있다. 전동기 기동시에 이 변압기 2차모선의 전압변동율을 10[%] 이내로 유지하려면 전동기를 직입기동으로 최대용량은 얼마까지 가능한지 계산하시오. 여기서, 전동기 기동역율 25[%], 기동계급 F급(7.0[kVA/kW]), 변압기 전원측 임피던스는 "0"이고 선로임피던스는 무시하고 임피던스의 저항분은 무시한다.]
		1. 계산 조건
		1) 변압기 용량 : 1,000KVA, %Z = 5%
		2) 변압기 2차 모선의 전압 변동률 10%
		3) 기저부하 : 800KVA
		4) 기동역율 : 25%, 기동계급 7[KVA/KW]
		2. 용량 계산
		1) 변압기의 %Z
		$\%Z = (I_N Z_T / V) * 100[\%]$ ----- 1식
		2) %Z가 5%인 변압기에 10% 전압변동율이 생긴다는 것은 1식에서 전류가 정격전류의 2배 (= 10[%]/5[%])가 된다.
		(1) $\%Z = (Z I_N / E) * 100 = P Z / 10 V^2$
		(2) $\varepsilon = \{(V_{20} - V_{2N}) / V_{2N}\} * 100[\%] \approx p \cos\theta + q \sin\theta$
		3) 즉, 이순간 변압기에 걸리는 부하는
		$W = \sqrt{3} V I = \sqrt{3} V (2I) = 1,000 * 2 = 2,000[KVA]$
		4) 전동기 용량은 M[kw]라고 하면 기동계급이 F급으로 7[KVA/KW], 전동기 기동용량은 7M [KVA]가 된다.
		5) 기동시 유효, 무효 전력은 기동역율이 25%이므로
		(1) 유효전력 : $P = 7.0M[kva] * \cos\theta = 7.0M * 0.25 = 1.75M[kw]$
		(2) 무효전력 : $P = 7.0M[kva] * \sin\theta = 7.0M * 0.968 = 6.78M[kvar]$
		6) 기저 부하와 전동기 기동 용량의 합이 기동시의 피상전력이 된다.
		$P + jQ = (800 + 1.75M) + j6.78M = 2,000KVA$
		7) 상기 식의 양변을 제곱해서 2차 방정식의 근의 공식을 이용하여 M을 구하면

[illegible]