

22 KV 陰城系統 橫流 防止에 關한 研究

趙 健 績* · 章 祥 炫** · 朴 錫 悼***

1. 概 要

22 KV 陰城系統 負荷는 槐山發電所에서 發電機 出力 2600 KW(1300 KW gen 2 대)로 供給되고 그 剩餘電力이 陰城 s/s 主變壓器를 通하여 66 KV 系統에 供給되는 경우와 發電機 出力 減少(渇水期 및 運休時)는 66 KV 측에서 供給받는 경우가 있다.

前者의 경우 22 KV 系統에 橫流(cross current)가 흘러서 電力損失이 많아지므로 이를 改善하고자 陰城 및 付坪變電所에 電力用 condenser 設置를 하였고 또 主變壓器 tap 調整으로 다소 防止했으나 아직도 系統에 橫流가 흐르고 있으므로 이를 測定하고 그 對策을 講究코져 한다.

2. 測定 項目

- (1) 電壓 變化에 對한 無効電力 變化
- (2) 槐山發電所 出力 變化에 對한 無効電力 變化
- (3) 22 KV 系統에 設置된 電力用 condenser 容量變化에 對한 無効電力 및 電壓變化
- (4) 槐山發電所 單獨運轉時(66 KV 系統과 分離) 無効電力 潮流 및 電壓分布
- (5) 66 KV 측에서 22 KV 系統 負荷를 供給할 時 無効電力潮流 및 電壓分布(槐山發電所運休)

參考: 測定時 系統 負荷狀態에서 試驗을 하였으므로 負荷 變動에 依한 測定誤差, 配電盤 計器 誤差 및 無効電力은 單相電力計를 使用하여 測定하였으므로 系統 負荷 不平衡에 依한 誤差는 旣지 不함.

3. 試驗 事項

가) 現 系統 概要 및 基礎 試驗

1) 22 KV 陰城系統 系統圖

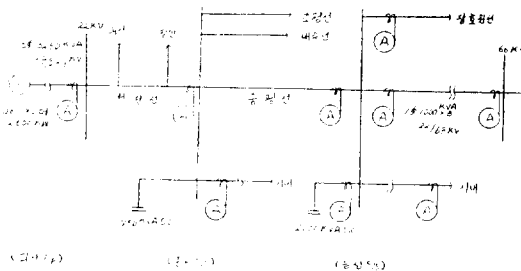


그림 1. 계통도

2) 機器 仕様

(ㄱ) 발전기 (2 대)

KVA	1625	R.P.M	600	pf: 0.8
KW	1300	Volts	3300	type ATI
Amp arm	284			
Amp field	110			
Ex	Volts	125	Phase 3.	60 N

(ㄴ) 피산 발전소 주변압기

Rating KVA	3250
Voltage rating	2200 Y-3300
Impedance volts	5.67% 2200 Y-3300 at 3250 KVA
Tap Pos.	Volt.
1	23100
2	22550
3	22000
4	21450
5	20900

주: 현재 사용 TQ; 3300 V/2300 V (tap1)

(ㄷ) 음성 s/s 주변압기

連續 定格型 H.C.R.式 FCOCF
 1 φ 60 N 1000 KVA
 정격-차단자전압 5700 V 17.6 A
 정격 차단자전압 22000 V 45.5 A
 단락전압 9.35% 잠극성

Tap pos.	단락	전압
1	63000	15.9
2	60000	16.7
3	57000	17.6
4	54000	18.5

서기 1939年 1月 芝浦제작

주: 현재사용 tap 63 KV/22 KV (tap 1).

(ㄹ) 전력용 condenser 설치장소 및 용량
 음성 s/s 22 KV bus에 2000 KVA
 중평 s/s 22 KV bus에 750 KVA

3) 선로정수

(ㄱ) 22 KV 송전선로 정상 impedance

중평선(음성 s/s~중평 s/s); $Z=22.98+j 11.15$

* * * * * 韓電電氣試驗所 第一研究室 · 正會員

청안선(증평 s/s~괴산 s/s); $Z=14.02+j 14.27$

음성 s/s~괴산 p/p 간; $Z=37+j 25.42$

주: 1964. 7. 26 측정값임

(-) 선로 충전 용량

음성 s/s에서 22 KV 계통 부하를 차단하고 괴산 음성간 선로 충전 용량은 다음과 같이 측정되었다. 단 장호원선은 차단치 않았음.

상	전압 (V)×200	전류 (mA)×15	비고
A	112	182	64.7.26 측정
B	111	183	//
C	110	220	//
평균	22200	195×15=2925	

$$\text{충전용량} = \sqrt{3} VI \times 10^{-3} = \sqrt{3} \times 22200 \times 195 \times 10^{-6} \times 15 = 112.5 \text{ KVA}$$

$$\text{정전용량} = (2925 \times 10^{-3} \times \sqrt{3} \times 10^6) / (2 \pi f \times 222000) = 0.615 \mu\text{F.}$$

나) 電壓변화에 대한 無効電力 변화

괴산발전소에서 발전기 전압을 변화시켰을 때 음성 s/s에서 증평선에 흐르는 무효전력과 발전소에서 22 kv 측에 흐르는 무효전력을 측정하여 전압과 무효전력 조류 관계 및 증평선(증평 s/s~음성 s/s)의 선로 손실을 조사하여 보면 다음과 같다.

1) 22 KV 계통 전력용 condenser 를 분리했을때

表 1.

괴산 p/p			증평 s/s			음성 s/s				증평선	비고		
22 KV 측			청안선			증평선			M. Tr	선로손실			
KV	KW	KVar	KV	KV	KVar	KV	KV	KVar	P.F	KV	KVar	KV	괴산 p/p
25	2600(+)	250	22	2397(-)	334	20.85	1940(-)	600	(-)96%	890(-)	1645	217	p/p
24	2600 ± 0	0	22.5	2308(-)	436	20.75	1866(-)	834	(-)92	816(-)	1800	222	//
23	2600(-)	650	21.5	2328(-)	1092	20.15	1800(-)	1482	(-)78	710(-)	2431	308	//
20.8	0	0	20	236(+)	27	20.45	450(+)	234		1.550(+)	1236	14	gen trip

주: (1) KVar 값의 "+" 기호는 지연율 (lag)
(2) KVar 값의 "-" 기호는 전역율 (lead)

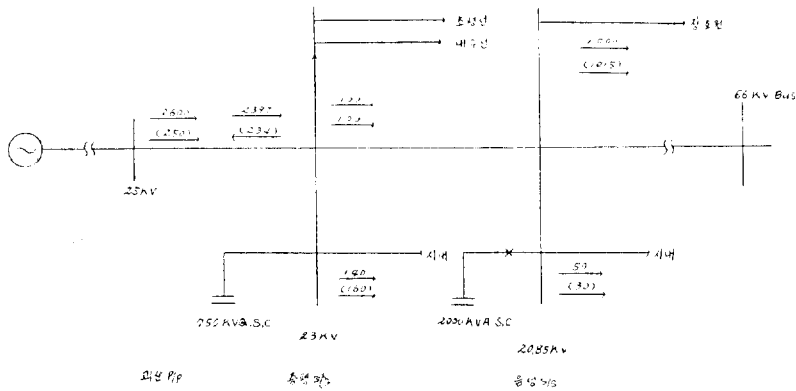


그림 2. 괴산 P/P 전압 25000 V 때 부하전력 조류도

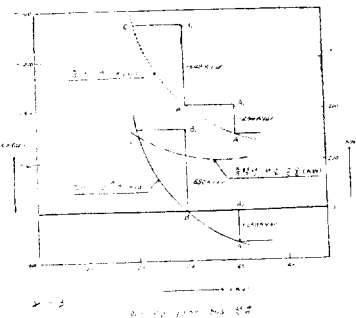


그림 3. KV-KVar 곡선도

주: (1) 괄호내의 숫자는 무효전력

(2) 화살표는 조류 방향

그림 3의 곡선은 괴산 발전소에서 발전기 계자를 조정하여 전압을 변화시켰을 때 무효전력 조류와 증평선 선로 손실을 도식한 것이다.

그림 3에서 보면 발전기 전압을 상승시킴에 따라 발전기 무효전력 출력이 증가하고 증평선에 흐르는 무효전력은 이에 따라 감소하며 또한 증평선 선로 손실도 감소함을 알 수 있다.

즉 발전소 22 KV bus 전압이 23 KV에서 24 KV로 상

승 되면 곡선 A.B.C.에서 $\overline{BB_1}=650$ KVar 만치 무효전력 소모가 감소됨에 따라 곡선 A'B'C'는 $\overline{B'B_1}=648$ KVar 만치 발전기 축으로 역류하는 무효전력이 감소하며 전압이 25 KV 때는 발전기가 무효전력을 $\overline{AA_1}$ 250 KVar 을 부하축에 공급함으로써 증평선은 $\overline{A'A_1}=234$ KVar 가 감소된다. 이것은 어떤 bus 전압을 상승 시킴으로써 무효 전력 조류를 제어할 수 있다는 것을 알 수 있다.

발전기가 22 KV bus 전압이 23 KV 에서 24 KV 사이는 무효전력을 소모하는 진 역을 운전을 하게 되며 전압 상승으로 무효전력 소모가 감소됨은 발전기 무효전력 출력의 증가를 의미하게 된다. 22KV bus 전압이 24 KV 일 때 발전기는 무효전력 소모도 없고 외부에 공급도 하지 않는다. 전압을 24 KV 에서 25 KV 로 상승시킴으로써 발전기는 무효전력을 (out 250 KVar) 의부에 공급하며 지역을 운전을 하게 된다. 따라서 발전기 제자리를 증가시키 발전기 단자 전압을 상승시킴으로써 음성 S/S에서 발전기를 향하여 흐르는 무효전력을 감소 시킬 수 있으며 보다 높은 전압으로 전력을 반송한다면 횡류 (cross current)를 완전히 제어할 수 있음을 알 수 있다.

2) 무효전력이 계통 전압에 미치는 영향

괴산발전소 22 KV bus 전압을 변환 시킴에 따라 무효 전력 조류가 상이함은 어떠한 전압 변동도 계통 KVar 에 영향을 주게 된다는 것을 알 수 있다. 계통의 일부에서 타부로 가는 KVar 의 반송은 전압의 상관적 변동에 달렸다.

즉 괴산발전소의 22 KV bus 전압을 음성 s/s bus 전압보다. 올리려고 한다면 KVar 의 조류는 괴산발전소축으로 흘러 들어 오는 방향은 감소되거나 괴산 발전소에서 흘러나오는 방향은 증가되어야 한다(그림 3 참조) 따라서 KVar 가 음성 s/s 22 kv bus 에서 괴산쪽으로 흘러나 오고 있을 때는 언제나 음성 s/s bus 가 22 KV 계통 전압 상태에 도움을 주고 있다는 것이다.

3) 무효전력이 계통 전압강하 및 선로손실에 주는 영향

(가) 전압강하

선로전압의 백분율로 표시된 등상 전압강하 값은 다음 공식으로 표시 된다.

$$V' = \frac{R KW + XKVar}{10 \times KV^2} \tag{1}$$

단. V' = % 전압강하

- R : 한개 도선의 저항값 (Ω)
- X : 한개 도선의 reactance (Ω)
- KW : 유효전력 (3φ, KW)
- KVar : 무효전력 (3φ, KVar)
- KV : 선간전압 (KV)

위 식은 단거리 송전선의 경우이며 첫항 RKW/10KV²

은 항상 정(正: +) 부호가 되고 제 2 항 XKVar/10KV² 은 정(+)으로도 부(-)로도 된다. KVar 조류가 유효전력과 동일한 방향 (수전단으로)일때는 이 값은 부(-)가 되며 V'는 제 1 항과 제 2 항의 차가 된다. 만일 V'값이 부(-)가 되면 전압 상승 또는 수전단 전압이 송전단 전압보다 크다는 것을 나타 낸다.

(나) 송전손실

송전선에 있어서 손실은 KW 손실과 KVar 손실로 구분 된다.

$$\text{손실} = \frac{3 I^2 R}{1000} \text{KW} \tag{2}$$

단 I : 선전류

R : 도체 한개의 저항

이 손실을 KW 와 KVar 로 표시 하면

$$\text{KW 손실} = \frac{R(KW^2 + KVar^2)}{100 \times (KV)^2} \text{KW} \tag{3}$$

$$\text{KVar 손실} = \frac{X(KW^2 + KVar^2)}{1000 \times (KV)^2} \text{KVar} \tag{4}$$

단. R : 한개의 도선 저항

X : 한개의 도선 reactance (유도저항)

KW : 유효 전력 (KW)

KVar : 무효 전력 (KVar)

KV : 선간 전압 (KV)

위 손실 공식은 단거리 송전 선로에 작용된다. 운전 중에 있는 계통에 있어서는 필요한 전력이나 또는 저항 및 reactance (유도저항)을 변경시키는 것은 불가능하지만 여러 경우에 있어서 KVar 의 분배를 변경 시킬 수는 있다.

송전선의 최소의 손실을 위하여서는 KVar 조류로 인한 손실을 최소로 감소할 필요가 있다. 이러한 조건은 선로 양단에서 흘러 나가는 KVar 조류가 꼭같을 때 얻을 수 있다. 그러나 전체 계통 손실은 모든 기기에 있어서의 손실도 포함되며 송전선 손실뿐 아니므로 전체 계통의 최소 손실 조건은 최소 선로 손실을 위한 운전과 일치하지는 않는다.

다) 괴산 발전소 출력 변화에 대한 무효전력 변화

괴산 발전소 발전기 전압을 일정하게 유지하고 발전기 출력을 변화 시키면서 계통 무효전력 조류 관계를 조사한다. (이때 발전기 여자 전류 일정)

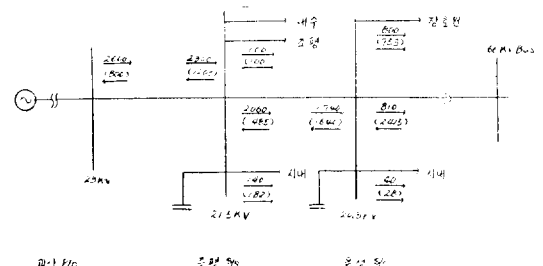


그림 4. 부하 전력 조류도 (출력 2600 KW 때)

表 2.

과 산 p/p			증 평 s/s			음			성 s/s			증평선	비 고
22 KV 측			청 인 선			증 평 선			M. Tr			선로손실	
23	2600	(-) 800	21.5	2300	(-)1203	20.3	17400	(-)1640	(-) 72	810	(-)2415	320	22 KV 계통 S.C. off.
23	2000	(-) 480	22	1852	(-) 722	20.7	1400	(-)1120	(-) 79	420	(-)1905	173	
23	1500	(-) 170	22	1338	(-) 380	21.0	1000	(-) 740	(-) 81	30	(-)1560	78	
23	1000	(+) 120	22	820	(-) 27	21.2	600	(-) 339	(-) 84	(-) 360	(+)1260	24	

주: 측정 오차

음성 s/s 22 KV bus에서

$$KW : 1740 - (800 + 810 + 40) = 9 KW$$

$$KVar : 2415 - (1640 + 753 + 28) = -6 KVar$$

그림 4는 과산 발전소 발전기 출력 2600 KW 때 전력 및 무효 전력의 조류도다. 이 그림에서 보면 66 KW 측에서 22 KV 계통으로 2415 KVar가 흘러들어와 부하가 요구하는 KVar를 공급하고 그 잉여분이 발전기를 향하여 흘러들어간 것이다. 즉 발전기가 800 KVar를 소모하고 있는 결과가 된다. 제 2표를 도시하면 그림 5와 같다.

그림 5에서 보면 발전기 출력이 1000 KW 때 무효전력 120 KVar(out)가 부하를 향하여 흘러 나가고 있다. 그러나 출력이 점차로 증가함에 따라 발전기 KVar 출

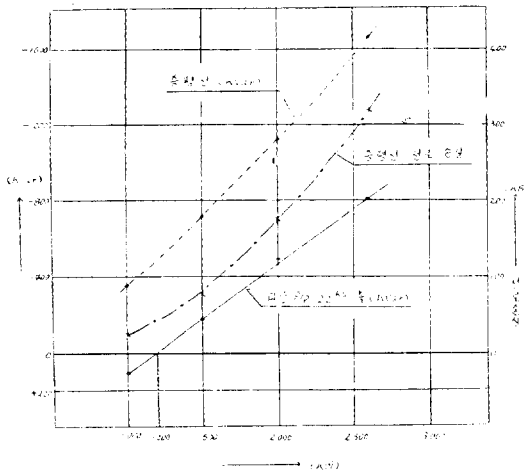


그림 5. KW-KVar 곡선도

력이 감소되어 출력 1200 KW 때는 영(zero)이 되고 그 이상의 출력 증가에 따라 발전기는 KVar를 소모하는 전역을 운전할 하게 됨을 알 수 있다.

증평선의 발전기를 향하여 흘러 들어오는 무효 전력은 발전기의 무효전력 출력 감소에 따라 증가되며 선로 손실도 발전기 출력 증가에 따라 증가함을 알 수 있다.

이것은 발전기는 부하가 적게 걸려 있는데 거기에 부하가 더 걸리게 되면 동일한 단자 전압을 유지하기 위하여 계자전류를 증가시키거나 KVar출력을 감소시켜 계자의 세기를 증가 시켜야 될 것이다. 즉 발전기 여자전류를 일정 (65 A)하게 유지하고 출력력이 증가되었으므로 동일한 단자 전압(23KV)을 유지하기 위하여 KVar 소모를 증가 시켜서 계자의 세기를 증가시켜야 될 것이다. 발전기에서 나오는 KVar는 계자에 감자 효과가 있으며 발전기에 흘러들어가는 KVar는 계자에 증가효과를 갖이고 있기 때문이다. 따라서 발전기 KVar출력은 계자 전류를 일정하게 유지한다면 부하 변동에 영향을 받게 되며 이는 단자 전압에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

라) 22 KV 계통에 설치된 전력용 condenser 용량 변화에 대한 무효전력 및 전압변화

22 KV 계통에 설치되어 있는 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때 무효전력 조류 송전 손실 및 계통 전압변화를 조사한다.

그림 6은 22 KV 음성 계통에 설치되어 있는 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때의 부하 전력 조류를 표시한 것이다.

表 3에서 보면 22 KV 계통에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입함으로써 계통 bus 전압은 상승되고 또

表 3.

계 통 상 태	과 산 p/p			증 평 s/s			음			성 s/s			증평선	청안선
	22 KV 측			청 안 선			증 평 선			M. Tr			손 실	손 실
계통 S.C. off	KV	KW	KVar	KV	KW	KVar	KV	KW	KVar	KW	KVar	KW	KW	
계통 S.C. off	23	2600	(-) 640	22	2250	(-)1003	20.2	1670	(-)1480	600	(-)2265	281	150	
증평 S.C. on	23.6	2600	(-) 780	22.5	2207	(-)1261	20.8	1734	(-) 910	285	(-)1830	203	193	
음성 S.C. on	24	2600	(-) 800	23	2174	(-)1442	22	1600	(-)1900	489	(-) 765	294	226	
중·음 S.C. on	24.8	2600	(-)1090	24	2251	(-)1828	22.7	1700	(-)1510	870	(-) 90	231	150	

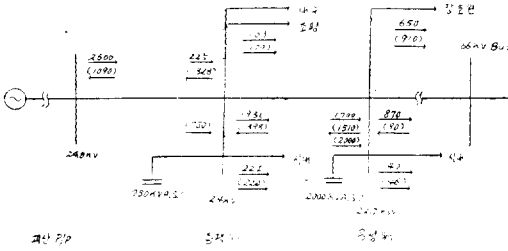


그림 6. 증평 S/S 및 음성 S/S S.C를 계통에 삽입했을 때 부하전력 조류도

주: 측정오차

음성 s/s 22KV bus에

$$KW : 1700 - (650 + 870 + 40) = 140 KW$$

$$KVar : (2000 + 90) - (151 + 910 + 46) = -376 KVar$$

한 22KV 계통에서 필요로 하는 KVar 치도 증가됨을 나타내고 있다.

표 3을 22KV 계통 S.C. 용량변화에 대한 KVar의 종류 및 선로 손실을 도식하면 그림 7과 같다.

그림 7을 보면 처음 계통 전력용 condenser를 전부 계통에서 분리했을때 66KV 측에서 22KV 측으로 공급된 총 KVar 값은 2265 KVar 이고 음성 s/s 22KV bus에서 발전기 측을 향하여 흐르는 KVar 값은 1480 KVar 이며 발전기가 소모하는 KVar 값은 640 KVar 이다.

증평 s/s에 설치된 750 KVA의 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때를 보면 곡선 A, A₁, A₂, A₃에서

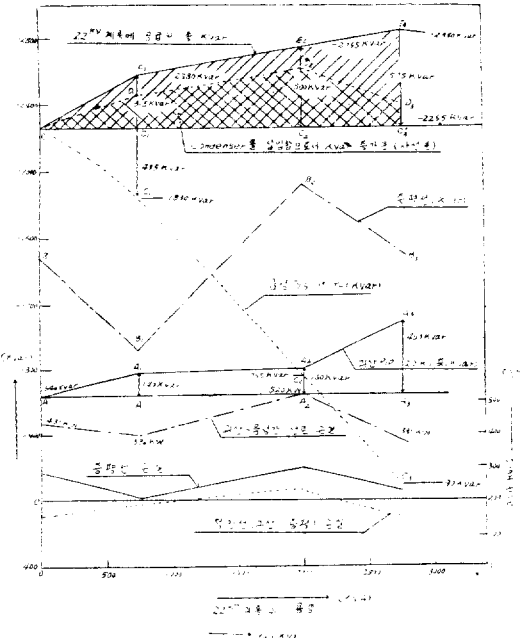


그림 7. 系統 S.C 용량 변화에 對한 KVar 潮流 및 線路損失

A 점은 A₁ 점으로 이동함으로써 발전기가 소모하는 KVar 값은 condenser를 삽입 전보다 $\overline{A_1A_1} = 140 KVar$ 가 증가되었으며 곡선 C, C₁, C₂, C₃에서 보면 66KV 측에서 22KV 측으로 흘러 들어 오는 KVar 값은 $\overline{C_1C_1} = 435 KVar$ 감소되었으나 증평 S/S 전력용 condenser 750 KVar를 가산하면 22KV 측에서 소모하는 총 KVar 치는 condenser를 삽입전보다 $\overline{C_1'D_1} = 315 KVar$ 증가되었고 발전기 KVar 소모증가분 140 KVar를 감하면 22KV 측 부하가 요구하는 KVar 및 KVar 손실은 $\overline{C_1'D_1} = 175 KVar$ 이 증가됨을 알 수 있다.

음성 s/s에 설치된 2000 KVA의 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때 22KV 계통 전력용 condenser를 계통에 삽입전 보다 발전기가 소모하는 KVar는 $\overline{A_2A_2} = 160 KVar$ 증가되었고 66KV 측에서 22KV 측으로 흘러 들어 오는 KVar는 $\overline{C_2C_2} = 1500 KVar$ 감소되었으나 22KV 계통에서 소모는 총 KVar 치는 500 KVar 증가되었으며 발전기가 소모하는 KVar의 증가분 $\overline{A_2A_2} = 160 KVar$ 를 감하여도 $\overline{C_2'D_2} = 340 KVar$ 가 증가됨을 알 수 있다.

증평 s/s 및 음성 s/s에 설치된 총 2750 KVar의 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때 역시 22KV 계통에서 소모하는 총 KVar 값은 $\overline{C_3E_3} = 575 KVar$ 증가되었으며 발전기가 소모하는 KVar의 증가분 $\overline{A_3A_3} = 125 KVar$ 를 감하여도 $\overline{C_3'D_3} = 125 KVar$ 가 증가됨을 알 수 있다. 즉 22KV 계통에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입함으로써 삽입전보다 22KV 계통에 공급된 총 KVar 값은 면(面) CE₁E₂E₃C₃ 만치 증가되며 그 중에서 발전기 KVar 소모 증가분 면(面) CE₁E₂E₃D₃D₂D₁을 감하여도 22KV 계통 부하가 요구하는 KVar 및 KVar 손실은 면 CD₁D₂D₃C₃' 만치 증가됨을 알 수 있다. 또한 22kv 계통 전력용 condenser를 계통에 삽입함으로써 표 3을 보면 계통 bus 전압의 상승을 보이고 있는데 계통 부하의 전압특성을 고려하여 무효전력 조류 및 송전 손실에 대하여 검토하여 보면 다음과 같다.

1) 전압 변화에 대한 부하전력 변화

각종 부하의 전압 특성

전동 부하 $P = KV^{1.6}$ $Q = 0$

전열 부하 $P = KV^2$ $Q = 0$

변압기 철손 $P = KV^2$

// 여자용량 $Q = KV^{8 \sim 6} \sim KV^{5 \sim 3}$

전력용 condenser $P = 0$ $Q = -KV^2$

유도 전동기 $P = KV^{0.8 \sim 1.2}$ $Q = KV^{1.6}$

22KV 계통에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입하면 계통 전압은 상승함을 표 3에서 알 수 있다.

22KV 계통 부하는 전동 전열 변압기 및 유도전동이

로 구성되었다고 본다면 부하의 전압특성으로 보아 계통 전압 상승은 KVar 소모의 증가를 갖어 오므로 그림 7에서 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때 부하가 요구하는 KVar의 증가는 이러한 부하의 전압 특성에서 기인 된것으로 볼 수 있다.

2) 계통 전압과 무효전력 조류

그림 8은 22 KV 음성 계통에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입 전 피산 p/p 22KV 측 전압 23 KV를 100%로 보고 전력용 condenser를 계통에 삽입 했을 때의 전압 상승을 도시한 것이다.

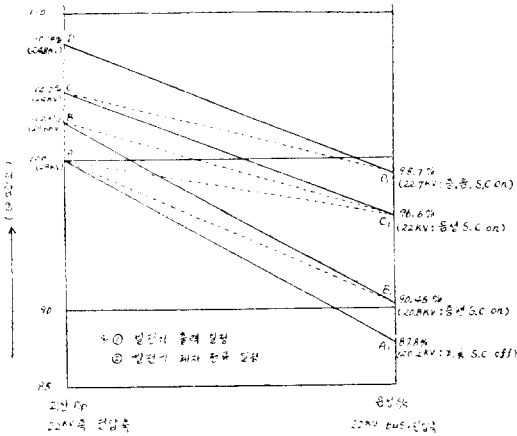


그림 8.

그림 8에서 보면 전력용 condenser를 계통에서 분리했을 때 피산 22 KV 측 전압 23KV(100%)이고 음성 s/s 22 KV bus 전압은 20.2 KV(87.8%)이다. 중평 s/s 전력용 condenser를 계통에 삽입함으로써 음성 s/s 22 KV bus 전압은 A₁ 점에서 B₁점으로 이동하였다.

즉 피산 p/p 22 KV 측 전압에 비하여 90.45% 점으로 이동함으로써 A₁ 점보다 2.65% (90.45% - 87.8%) 상승했으나 피산 p/p 22 KV 측 전압은 A 점에 있으므로 직선 AA₁은 점선 AB₁으로 이행 됨으로 음성 s/s 22 KV bus 전압의 상승은 발전기 전압의 강화를 의미하게되며 이로 인하여 음성 s/s에서 발전기를 향하여 흐르는 횡류 cross crourent는 증가되며 동시에 발전기 전압은 상승하여 점선 AB₁은 직선 BB₁으로 이행되고 피산 22 KV 측 전압도 2.6% 상승한 B點에 머무르게 된다.

음성 s/s 2000 KVA 전력용 condenser를 삽입했을 때도 같은 이유로 직선 AA₁은 점선 AC₁으로 이행되어 발전기측 전압은 C점에서 머무르게 된다.

중평 s/s 및 음성 s/s에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때도 전압의 이행은 위와 같다.

단일 발전기가 KW를 발전하고 KVar를 발생하는 계통에 연락되었고 bus 전압이 외부 전원으로 부터 상승되

었다면 발전기의 KW 출력은 변동없으나 KVar 출력은 감소하며 KVar 출력의 감소는 발전기가 소모하는 KVar 값의 증가를 의미한다. 또한 이와 반대로 모선 전압이 외부 전원으로 말미암아 감소되었다면 발전기 KW 출력은 변동 없으나 KVar 출력은 증가하며 KVar 출력의 증가는 발전기가 소모하는 KVar 값의 감소를 의미한다.

즉 발전기의 계자와 부하를 일정하게 유지한 Kvar 출력은 모선 전압에 의거한다.

그림 7에서 보면 계통 전력용 condenser를 계통에 삽입함으로써 66 KV 측에서 22 KV 측으로 흘러 들어오는 무효전력은 감소하며(그림 7 곡선 C₁ C₂ C₃)이 KVar의 감소는 음성 s/s 22 KV bus 전압의 상승을 의미하게 됨으로 그림 8에서 설명한 바와 같이 횡류는 발전기 전압을 상승하는 방향(발전기를 향함)으로 증가하게 된 것이다.

따라서 22 KV 계통에 설치된 전력용 condenser를 계통에 삽입해도 계통 전압을 보상되나 무효 횡류는 제어할 수 없다.

3) 송전손실

전력을 반송하는데 손실은 식(3)에서 보면 무효전력의 감소가 바로 손실의 감소가 된다.

그림 7에서 보면 계통 전력용 condenser를 전부 계통에 삽입했을 때가 손실이 적고 음성 s/s 200 KVA condenser만을 계통에 삽입했을 때와 중평 s/s 750 KVA condenser만을 계통에 삽입했을 때가 손실이 적고 음성 s/s 200 KVA condenser만을 계통에 삽입했을 때 손실이 가장 많다. 피산 음성간 선로 손실은 곡선 B B₁ B₂ B₃와 거의 비슷한 곡선으로 표시된다. 이것은 전력을 반송하는데 선로 손실은 중평선 KVar 조류와 같이 증감하는 것을 알 수 있다.

계통 전압 및 선로 손실, 발전기 소모 무효전력을 고려한다면 중평 s/s 750 KVA 전력용 condenser를 삽입했을 때가 가장 효과적임을 알 수 있다.

마) 피산 발전소 단독 운전시 (66 KV 계통분리) 무효전력 및 전압분포

음성 s/s에서 66 KV 측을 분리시키고 22 KV 계통 부하에 대하여 피산 발전소에서 단독으로 공급할시 22 KV 계통 전력용 condenser 용량 변화에 대한 전압 분포 및 부하 전력 조류를 조사한다.

그림 9는 계통 분리코 중평 s/s 750 KVA condenser를 계통에 삽입했을 때의 부하전력 조류도이다. 이때 발전기는 22 KV bus에서 볼 때 500 KVar의 무효전력을 계통에 공급하고 있으며 중평 s/s에서도 750 KVar의 무효전력을 공급하게 됨으로 계통 무효전력 공급원은 1250 KVar을 계통 부하에 공급하고 있음을 알 수 있고 발전

表 4.

계통 상태	피 산 p/p			증 평 s/s			음 성 s/s			증평선 손실		
	22 KV 측			정 안 선			증 평 선				M. Tr	
계통분리전 증평 s/s S.C.on	KV	KW	KVar	KV	KW	KVar	KV	KW	KVar	KW	KVar	KW
계통분리 계통 S.C. off	23.6	2600(-)	620	22.5	2,200(-)	1055	20.45	1734(-)	726	720(-)	1530	134
증평 S.C. on	23.4	1600(+)	1000	21.5	1360(+)	911	19.45	1067(+)	650	-	-	31
음성 S.C. on	24	1500(+)	500	22	1173(+)	275	21.45	867(+)	726	-	-	34
음성 S.C. on	24.2	1800(-)	450	23.5	1486(-)	516	22.7	1140(-)	844	-	-	34
증.음 S.C. on	24.8	2000(-)	1000	24	1597(-)	1708	23.3	1200(-)	1324	-	-	135

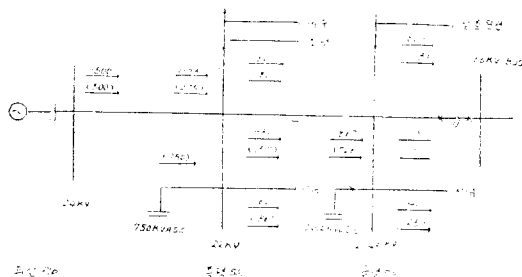


그림 9. 계통분리시 부하 전력 조류도 (증평 S.C.on)
주: 측정오차

음성 s/s 22 KV bus에서
 $KW : 867 - (800 + 40) = 27 KW$
 $KVar : 726 - (703 + 25) = -2 KVar$

기는 지역을 운전을 하고 있다.

그림 10은 表 4의 측정값을 계통 전력용 condenser의 용량 변화에 대한 KVar의 조류, 선로손실 및 전압 분포를 도시한 것이다.

그림 10에서 음성 s/s 2000 KVA condenser를 계통에 삽입하면 발전기가 450 KVar를 소모하는 지역을 운전하게 되며 또한 증평 s/s 음성 s/s에 설치된 전력용 condenser(용량: 2750 KVA)를 삽입하면 844 KVar를 소모하게 된다. 즉 음성 s/s 22 KV bus 전압의 상승과 동시에 발전기의 KVar 출력은 감소되며 발전소 22 KV bus 전압은 상승하게 된 것이다. 발전기는 22 KV 계통 전력용 condenser 용량의 증가에 따라 KVar 출력은 점차로 감소되어 그림 10의 0점을 지나서는 계통 부하가 요구하는 KVar를 초과 공급케 됨으로 그 초과분을 발전기가 소모하는 지역을 운전하게 된다. 따라서 발전기가 지역을 운전할려면 22 KV 계통 condenser 용량은 1425 KVA를 초과해서는 안된다(측정시부하 상태에서)

그림 10에서 면적 OAB는 계통 KVar 공급 초과로 발전기가 소모하는 KVar 량이다. 계통 전압은 계통 전력용 condenser 용량 증가에 따라 상승되나 증평선 손실은 보면 증평 s/s 750 KVA 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때 가장 적으며 이때 발전기는 지역을 운전하게 됨으로 66 KV 측을 분리하고 단독 운전 할시는 증평 s/s에 설치된 750 KVA 전력용 condenser만 계통에 삽입하는 것이 가장 효과적이다.

바) 66 KV 측에서 22 KV 계통 부하를 공급할시 무효 전력 조류 및 전압 분포 (피산 발전소 운휴)

피산 발전소 운휴시(갈수기등)에 22 KV 계통 부하가 66 KV 측에서 공급받을 경우를 고려해서 이 때의 계통 무효전력과 전압분포에 대하여 조사한다.

그림 11은 22 KV 계통 부하에 대하여 66 KV 측에서 공급할 때 증평 s/s 750 KVA 전력용 condenser를 계통에 삽입했을 때의 전력 조류를 표시한 것이다.

증평 s/s bus에서 보면 750 KVA 전력용 condenser가

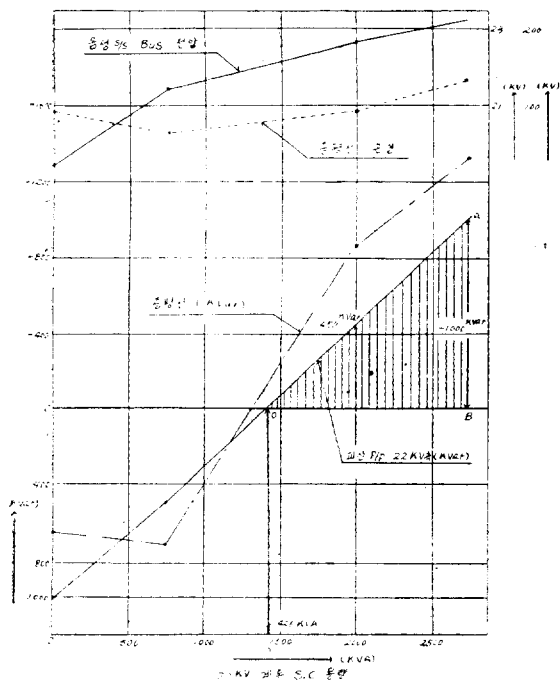
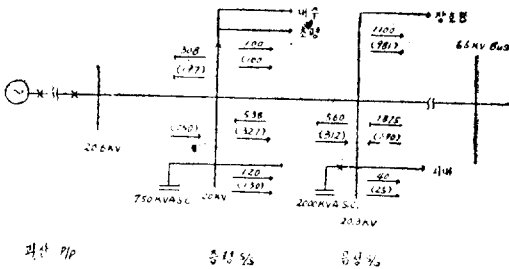


그림 10. 22 KV 系統 S.C 容量變化에 對한
 ① KVar 조류 ② 線路損失 ③ 電壓分布

表 5.

계통 상태	괴산 p/p			중평 s/s			음성 s/s				중평 손실	
	22 KV 측			청안 선			중평 선		M. Tr			
계통 S.C. off	KV	KV	KVar	KV	KW	KVar	KV	KW	KVar	KV	KVar	KW
계통 S.C. off	19.9	—	—	19.5	251(+)	21	19.7	500(+)	260	1770(+)	1050	19
중평 S.C. on	20.6	—	—	20	308(+)	197	20.3	560(-)	312	1875(+)	690	22
음성 S.C. on	21.2	—	—	20.5	315(+)	95	21.1	600(+)	363	2010(-)	570	25
중.음. S.C. on	22.2	—	—	21.5	262(+)	194	21.95	550(-)	260	2010(-)	1290	18

주: 이때는 전력 조류 방향이 66 KV 측에서 22 KV 계통으로 향하게 된다.



괴산 p/p 중평 s/s 음성 s/s
그림 11. 66 KV 측에서 공급받을시 부하전력 조류도(중평 S.C.on)

주: 추정오차

음성 s/s 22 KV bus 에서
 KW : 1875-(1100+560+40)=175 KW
 KVar : (312+690)-(981+25)=-4 KVar

계통에 삽입하면 중평 s/s 측 부하가 요구하는 KVar 를 공급하고 그 잉여분이 음성 s/s bus 를 향하여 전력과 역류 함을 알 수 있다.

따라서 음성 s/s 22 KV bus 에서 볼때는 66 KV 측에서 공급되는 KVar 값은 감소되며 계통 전압은 상승된다.

그림~12는 表 5 의 측정값을 도시한 것이다. 그림 12 에서 보던 66 KV 측에 서공급된 KVar 값은 22 KV 계통에 설치된 전력용 condenser 용량이 증가하면 점차적으로 감소하여 음성 s/s 200 KVA 전력용 condenser 를 삽입했을 때는 부하 전력과 역류하게 된다.

22 KV 계통 전압은 계통에 설치된 전력용 Condenser 용량 증가에 따라 상승됨으로 22 KV 계통 부하가 66 KV 측에서 전력을 공급받을 시는 22 KV 계통에 설치된 전력용 condenser 를 전부 계통에 삽입하여 운전함이 22 KV 계통에서 보아 효과적이다. 이때 전력 반송에 따라 선로 손실은 表 3 을 보아 증감을 무시하여도 큰 차는 없다.

4. 綜合檢討

22 KV 음성계통 무효전력 조류 제어에 대하여 다음 항목별로 검토코저 한다.

- (1) 전압조정과 무효전력 조류 조정
 - a. 변압기 tap 변경
 - b. 직열 condenser 설치
- (2) 발전기 진 역률 운전시의 정태 안정도

가) 전압 조정과 무효전력 조류 조정

계통이 확대 되면 무효전력은 전압 조정 능력이 크게 되며 계통의 전압 조정상 무효전력 조류 조정을 행할필요가 있다.

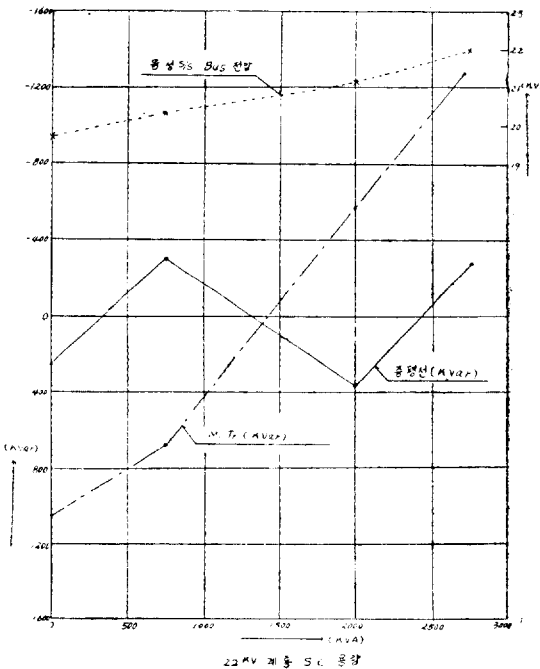


그림 12. 22 KV 系統 S. C 容量變化에 대한
 ① KVAr 潮流 ② 電壓分布



그림 13.

그림 13 과 같이 1 차 2 차 공전원(共電源)을 가진 계통에서 전압 조정기의 tap 변경에 의한 전압변화율은 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{dE_R}{dn} = \frac{\alpha(-n+2n+\alpha)}{(n^2+\alpha^2)} = E \quad (5)$$

n : 권선비

단 $\alpha = \frac{X_2}{X_1}$, E_1, E_2 : 발전기단자전압

즉 α 가 감소되면 dE_R/dn 가 적어진다. 2 차 축전원이 상대적으로 크게 되면 전압조정기에 의한 전압 조정 능력이 감소됨을 위 식에서 알 수 있다.



그림 14.

조상 설비에 의한 전압 조정 능력은 그림 14 계통에서 생각하면 다음 식으로 표시 된다.

$$\frac{dE_R}{dq} = -\frac{1}{(1-q)^2} E \quad (6)$$

$$\text{단 } q = \frac{1/X_c}{1/X_1 + 1/X_2} = (\text{condenser 용량/계통단락용량})$$

계통 condenser 용량과 단락 용량의 tap 비가 증가하면 전압 조정 능력이 커진다.

요약하면 전압의 큰 변동에 대해서는 전력용 condenser로 조정하고 전압 조정기의 bus 조정에 의한 무효전력 조류제어는 전압의 미소 변화에 대한 조정이 가능하다.

22KV 음성 계통에서 본다면 계통에 설치된 전력용 condenser 를 계통에 삽입하면 음성 s/s 22KV bus 전압은 상승되고 (그림 8 참조) 또한 계통전압을 조정하기 위하여 전압낮은 발전기 축을 향하여 전압을 상승시키는 방향으로 횡류가 흐르게 된다. 따라서 이 횡류를 방지하려면 증가시켜야 된다. 발전기측 전압을 상승시키기 위하여 피산 발전소 및 음성 s/s 주변압기 tap 변경에 대하여 검토하여 본다.

1) 변압기 tap 변경

22KV 음성 계통은 음성 s/s 주변압기에 통하여 무한대 모선에 연락되었다고 볼 수 있으므로 식(5)를서 X_1 은 X_2 보다 훨씬 큰 값이다. 고로 전압조정 능력은 극히 적게 된다.

현재 음성 s/s 및 피산발전소 주변압기는 tap 1에서 사용하고 있으므로 더 높일수는 없지만 66KV 축에서 22KV 계통을 흘러들어오는 무효전력의 일부를 감소시키는데 어느정도의 tap 를 높이면 되겠는가 계산하여 보기로 한다.

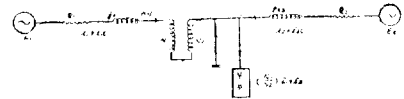


그림 15.

그림 15에서 I_1C 를 $(I_1C \pm \Delta I_1C)$ 로 하면 I_2C 는 $(I_2C \pm \Delta I_2C)$ 로 변화하게 된다. 그림에서 송전선을 reactance 분만을 가정해서 다음 식이 유도된다.

$$N_1 e \approx \Delta I_1 C \left\{ (X_1 + X_1 t) + \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 (X_2 + X_2 t) \right\} \quad (7)$$

$$CN_1 \Delta I_1 C = N_2 \Delta I_2 C$$

단 N_1, N_2 : 변압기의 1, 2 차 전회수

e : 변압기의 1 전선당 기전압

식 (7)에서 $\Delta N_1 e$ 는 변압기 1 차 축의 tap 전압이며 1 차 축 tap 를 $\Delta N_1 e$ 만치 높이면 2 차측에 흐르는 condenser 전류는 $\Delta I_1 C$ 만치 1 차로 미행하게 된다. 이와 같이 변압기 tap-를 조정하여 무효 전력 조류를 제어 할수 있다.

음성 s/s 주변압기 tap 를 62KV 에서 3000V(= $\Delta N_1 e \times \sqrt{3}$) 높이게 된다면 얼마의 KVar 를 제어 할수 있는가 계산하여 본다.

식 (7)에서

$$X_1 t > 0 \text{ 라 본다.}$$

$$X_1 t + \left(\frac{N_1}{N_2} \right) \times 2t \approx 101/3 = 33.7(\Omega)$$

$$\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 X_2 \approx 209(\Omega)$$

$$\therefore \Delta I_1 C \approx (3000/\sqrt{3}) / (33.7 + 209) \approx 7.14 \text{ A}$$

$$\text{KVar} = \sqrt{3} \times (1000 + 23100) \times 17 \times 10^{-3} \approx 710 \text{ KVar}$$

피산 발전소 주변압기도 현재 tap 1에서 사용하고 있으므로 더 높일 수는 없다. 그러나 24.100 V 의 tap 가 있다면 발전기가 소모하는 무효전력 700 KVar 정도는 감소시킬 수 있다.

위의 계산 결과로 본다면 변압기 tap 를 변경함으로써 무효전력을 약간 제어 할 수는 있으나 현재 사용하고 있는 변압기는 2 이상 높은 tap 가 없으므로 불가능하며 또한 22KV 음성 계통은 음성 s/s 주변압기를 통하여 무한대 모선에 연락되어 있으므로 66KV 축 모선 전압에 큰 영향을 받게 되며 발전기 출력도 적기 때문에 적은 부하 변동에 대해서도 영향을 받아 계통 무효 전력 조류의 증감이 심하게 된 것이다.

2) 전압 조정기를 사용할 경우

22KV bus(중평 s/s 나 음성 s/s)에 전압 조정기를 설치하여 음성 s/s M.Tr (22KV/63KV) 22KV 축 전압을 보상하며 주변압기 tap 변경을 대신할 수 있다.

이 때 전압 조정기 용량은

$$\text{용량(KVA)} = \sqrt{3} \times \text{조정전압} \times \text{정격전류} \times 10^{-3} \text{ (KVA)}$$

조정전압은 실측지에서 구하면 表4에서 음성 s/s bus 전압이 제일 낮은 값을 택하면

$$22 \text{ KV} - 19.45 \text{ KV} = 2.55 \text{ KV} \text{ (19.45 KV 의 13.1\%)}$$

즉 20 KV 13.5%로 하면 +2.7 KV가 된다. 조정전압 tap는 20.000에서 +20.540, +21.080, +21.620, +22.160, +22.700 V로 하면 된다.

정격 전류는, 발전기 역률 0.8

출력 2.600KW

$$\text{전류 (A)} = \frac{2600}{\sqrt{3} \times 22 \times 0.8} = 85 \text{ A}$$

전압조정기 용량(KVA) = $\sqrt{3} \times 2.7 \text{ KV} \times 85 \text{ A} = 397 \text{ KV}$
A 따라서 400 KVA의 전압 조정기를 설치하면 된다.

3) 직열 condenser 설치

직열 condenser를 설치 하여 송전된 reactance를 보상 한다는 것도 기술상의 문제가 따른다. 직열 condenser는 사고시 과전류나 과전압에서 보호하기 위하여 병렬로 낭전 간극을 설치하는 등 보호 장치가 복잡하게 된다.

22 KV 음성 계통 송전선은 단거리 선로이기 때문에 reactance 값도 처음으로 적은 용량의 condenser를 설치 하는데 복잡한 보호 장치를 설치해야 되며 또한 선로 impedance는 저항분과 reactance분이 거의 같음으로 선로의 전압 보상에 큰 효과는 볼수 없다.

나) 발전기 진 역률 운전시의 정태 안정도

괴산 발전소 발전기는 진 역률 운전을 하는 경우가 많으므로 이에 대하여 안정도를 검토코져 한다.

발전기 단자 전압을 정격치 (1-P/U)를 유지할시 정태 안전 한계는 다음 식으로 표시된다.

$$P+Q = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) e^{i \frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-i \pi/2} \tag{9}$$

$$= H + R e^{i \theta}$$

중심 : $H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) e^{i \frac{\pi}{2}}$

반경 : $|R| = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right)$

단 P : 유효전력

Q : 무효전력

Xd : 동기 impedance (단락비의 역수)

Xe : 외부 impedance (저항분 무시)

식 (9)에 의거 발전기 진 역률 운전한계를 구하여 본다. 이때 22 KV 음성 s/s 주변압기를 통하여 무한대 보

선에 접속되었다고 본다.

발전기 1625 KVA × 2

송전선 impedance: 25.42(Ω)

base 용량 3250 KVA

$$\text{base impedance} : \frac{E^2}{P} = \frac{(22 \times 10^3)^2}{3250 \times 10^3} = 148.6$$

$$\text{환산 송전선 impedance} : \frac{25.42}{148.6} = 0.172 \text{ (P/U)}$$

발전기 동기 impedance: 0.8914 (P/U)

변압기 (송수전단계) impedance : 0.165 (P/U)

식 (9)에서

$$Xd = 0.8914$$

$$Xe = 0.172 \times 0.165 = 0.337$$

$$\therefore H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.337} + \frac{1}{0.8914} \right) = \frac{1}{2} (2.97 + 1.12) = 0.925$$

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{0.337} - \frac{1}{0.8914} \right) = \frac{1}{2} (2.97 - 1.12) = 2.0$$

그림 16은 발전기 진역률 운전 한계를 도시한 것이다. 그림에서 보면 정태 안정도 한계 곡선과 운전 한계 직선의 교점이 진 역률 운전 한계점이다.

따라 최대 진 역률 무효전력은 -0.63(P/U) (Qmax = -0.63)이다.

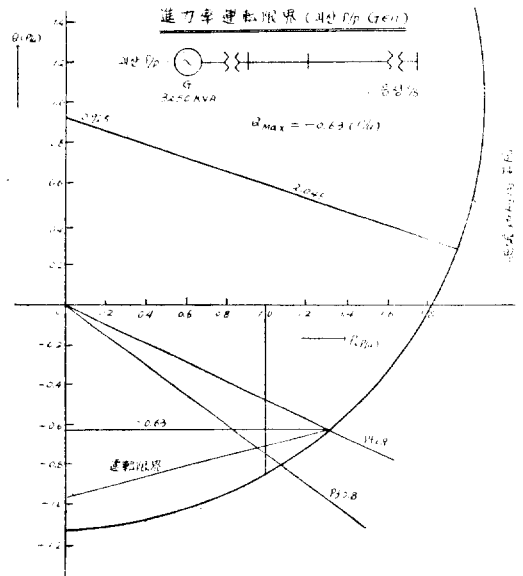


그림 16. 進力率 運轉 한계

괴산 발전소 발전기 100 KVar 내에서 운전하고 있으므로 운전 한계를 초과치 않음을 알수 있다.

6. 結 論

계통 전압과 이에 복수된 무효전력 제어는 계통이 확

대됨에 따라 복잡하게 된다. 그러나 무효전력 조류 조절은 전압 조정 및 선비의 최대 이용 한도를 항상 시킬 것으로 무효전력 조류조정이 적극적으로 활용되고 있다.

22 KV 음성 계통에서 전력용 condenser를 계통에 삽입하여도 전압 보상은 되나 횡류를 방지할 수는 없으며 횡류를 방지할 수 있는 대책은 다음 두가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

가) 계통에 기기를 보충할 경우

1) 음성 s/s 주변압기를 66KV tap가 있는 것으로 교체한다.

식 (7)에 의해 계산 결과 63 KV에서 3000 V 높임으로써 약 800 KVar의 무효전력을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

그러나 22 KV 계통 부하에 대해서 피산 발전소 운휴로(길수기등) 인하여 66KV측에서 하부 공급을 할때 22 KV측 전압이 현저하게 낮음으로 이때는 다시 변압기 tap를 63 KV로 옮겨야 함으로 tap조정이 정전을 요하는 등 번잡성을 피할 수는 없다.

피산 발전소에 설치된 변압기도 현재사용 tap(23/100 V)에서 약 1000 V 높임으로써 식(7)에 의해 계산결과를 보면 약 700 KVar의 무효전력은 제거할 수 있으나 그러한 변압기는 특별히 제작하지 않으면 구할 수 없음으로 불가능하다.

2) 22 KV측에 전압 조정기를 설치한다.

피산 p/p에서 음성 s/s간 전압 강하를 보상하여 음성 s/s 주변압기 22KV를 전압을 상승시켜 변압기 tap변경을 대신하여 횡류를 방지할 수 있다.

그러나 22 KV용 전압 조정기를 특별히 제작하여야 한다는 문제가 따른다.

나) 현시설을 이용할 경우

1) 발전기 단자전압을 정격치 보다 상승 운전한다.

발전소 22 KV bus 전압이 24 KV 이상일 때 발전기의 무효전력 소모는 없고 발전기가 무효전력을 부하측에 공급하게 된다(그림 3 참조). 이것은 계통 운전 상태에서 측정된 것임으로 운전 상태 변화에 따라 다소 변경될 수도 있다. 즉 발전기 계자를 안정한도내에서 최대한으로 증가시켜 발전기 단자 전압을 상승시켜 발전기가 지 역을 운전을 함으로써 횡류를 제어할 수 있으며 송전 손실도 감소되나 발전소 소내 전원의 상승을 고려하여야 된다.

2) 전력용 condenser를 이용한다.

계통에 설치된 전력용 condenser를 이용할 경우는 그림 7에서 증명 s/s 750 KVA condenser를 계통에 삽입했을때 계통 전압 보상도 되고 송전 손실도 감소되며 발전기가 소모하는 무효전력도 적어 가장 효과적이다. 이때 발전기는 진 역을 운전을 하게 되는데 발전기 계자를 증가시켜 발전기가 소모하는 KVar를 감소할 수 있으며 또한 그림 16에서 발전기의 최대 전압을 운전한계 $Q_{max} = -0.63(P/U)$ 를 초과치 못함으로 안전한 진 역을 운전이 가능하다.

이상 두 경우중 (가)의 경우는 음성 M.Tr을 66 KV tap가 있는 변압기로 교체하면 66 KV측에서 22 KV측 부하를 공급할시 말단 전압이 문제됨으로 전압 조정기를 22 KV 계통에 설치하여 22 KV측 전압을 상승시켜 전력을 반송함으로써 손실면에서나 또는 tap변경의 번잡성에서 볼때 보다 효과적이다.

또한 (나)의 경우는 계통 전압 보상 및 횡류 방지를 동시에 할 수 있는 방향으로 발전기를 운전하여야 된다. 즉 22 KV 계통 증명 s/s 전력용 condenser를 계통에 삽입하고 발전기 단자 전압을 정격치 보다 약 4~5% 상승 운전하면 효과적이다.

(1965年 4月 21日 接受)