

빗물배수 펌프장의 부하특성을 고려한 변압기용량 설계

글 / **곽노진** 남원건설엔지니어링(주) 이사·기술사

1. 개요

빗물펌프장은 지역침수로 인한 피해를 방지 또는 최소화시키는 것을 목적으로한 비상 시설물이며, 재해대책 시설로서 그 중요성이 커지고 있다. 여기에 그 시스템 운영에 있어서 중추적인 역할을 담당하는 기계·전기설비 시스템의 최적화, 효율화는 필수적이며 설비 자체의 안전과 시스템 운전

안전 확보가 우선되므로 과잉설비로 계획되어 경제적인 시스템 구축이 간과될 소지가 많다.

즉 상용설비가 아닌 일정기간(단기간) 운영되는 시스템은 안정성 확보를 기본으로 하고 또한 경제성도 고려해야 된다.

이러한 관점에서 필자가 설계한 K시의 배수펌프장 설계내용을 제시함으로써 안정성과 경제성을 동시에 고려한 사례를 기술하고자 한다.

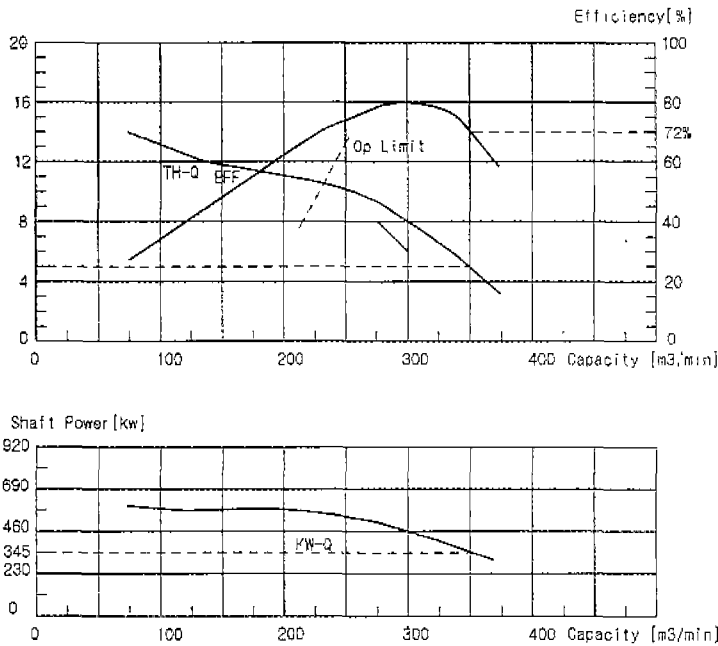


그림 1. 프로펠러형 수중 펌프 운전곡선
(정격 : 3.3kV, 14극 141A, 560kW, F절연)

표 1. 배수펌프장 가동시간

배수펌프장명	가동시간 (1998년도)	가동시간 (1999년도)
○○ 배수펌프장	68시간 11분	63시간 26분
○○ 배수펌프장	39시간 57분	49시간 5분
○○ 배수펌프장	22시간 34분	30시간 40분
○○ 배수펌프장	13시간 15분	16시간 7분
○○ 배수펌프장	68시간 45분	85시간 52분
○○ 배수펌프장	118시간 1분	102시간 59분
합 계	330시간 43분	348시간 9분

2. 부하특성을 고려한 변압기 용량 선정

2.1 부하특성

빗물펌프장의 주요 구성은 펌프와 주변설비(제진기, 컨베이어), 수문 및 전기설비(전력부하, 제어설비)로 구성되어 있다. 여기서 가장 큰 부하인 PUMP가 전체 부하의 대부분(90% 이상)을 차지하고 있다. 따라서 가장 비중이 큰 펌프의 설비 부하특성을 우선적으로 검토해야 된다.

그림 1은 펌프의 효율특성을 나타낸 것이며, 펌프의 효율특성은 일반적으로 수위(m)의 변화에 따라 그 효율(%)과 축동력(kW)이 상관관계에 따라 같이 변화한다. 그 변화 추이를 보면 설계 시방점에 따라 약간의 차이가 날 수도 있으나 효율(%)은 상승하다가 하강하는 곡선을 나타내고, 유량(m³/min)은 수위(차)가 적어질수록 많아진다. 여기서 축동력(kW)의 추이가 전기설비에서 중요 검토사항이 된다.

즉, 효율(%)과 수위(m)에 따라 축동력(kW)이 변화되는데 펌프의 종류에 따라 거의 비슷하거나 상승 또는 하강 곡선을 나타낸다.

여기서, 본 플랜트에 적용한 펌프형식은 프로펠러(와권)형으로 수위(차)가 적어질수록 유량증가, 축동력 감소현상을 보이고 있다는 점을 주목해야 한다.

2.2 운전상황 검토

빗물펌프장은 우기(6월부터 9월까지)에 적

용하기 위한 설비로 대개 운전기간이 짧다.

표 1에 의하면 2일에서 4일 정도 운전되는데, 이 기간 중에도 100% 가동 시간은 극히 짧은 시간이다. 즉 100% 가동시의 전력이 최대 수요전력이 되는데, 다음해 기본요금의 근거가 되므로 운전시 극히 회피하려고 하는 운전상황이 된다.

주요 부하는 배수펌프에 의한 유도 전동기 부하이며, 560kW Pump(Motor) 10대와 기타부하 200kVA(전동기, 전등)으로 구성되어 있으므로 유도 부하특성이 강하다.

2.3 변압기 용량 선정 (표 1)

1) 일반적인 기준

시스템 선정 결정시 핵심이 되는 사항이 변압기 용량 선정 계산이다. 지금까지 우리나라의 기존 건물이나 사회간접시설이 대부분 과잉 용량으로 보고되고 있다(운전부하는 시설용량의 최저 15%에서 대략 50%정도까지 운전됨).

일반적으로 식 (1)은 서울시의 빗물펌프장의 변압기용량 선정 식이며, 부하특성곡선을 고려하지 않고 계산한 개개 부하용량의 합으로 단순 계산식이다.

$$P[kVA] = \{ \sum P_k(kW) \times \frac{1}{\eta \times \phi} + \sum P_l(kW) \times \frac{1}{\eta \times \phi} + \sum P_o(kVA) \} \times \alpha \dots (1)$$

여기서, P[kVA] : 변압기 용량

ΣP_k (kW) : 고압부하 최대 수요전력의 합계

ΣP_l (kW) : 저압부하 최대 수요전력의 합계

ΣP_o (kVA) : kVA부하 최대 수요전력의 합계

η : 고압부하의 총합효율 (0.9 정도)

θ : 총합역율 (역율개선후 : 0.95 이상)

α : 변압기의 여유율 (1.1 정도)

2) 새로운 적용기준

변압기용량 선정에서 검토되어야 할 계수 값은 역률, 효율, 수용률 및 부동률 등이다. 그러나 현실에서는 역률, 효율과 수용률 및 부동률(주변압기 채택시 적용)의 총합이라는 개념으로 적용되는 것이 있다. 의미상으로 평균치, 안전을 고려한 정격치 개념으로 보이는데 부하가 상세히 파악되는 설계에서는 정확한 의미를 가진 역률, 효율 및 부하율 등을 적용하는 것이 바람직하며, 여기서는 수위(차) 변동에 따른 전류 변화를 고려하는 것이 과다 설계를 막는 포인트가 된다.

규모가 비슷하고 적용 펌프가 같은 유사사례를 조사한 결과(붙임 1 참조 : 타 배수펌프장 조사결과)를 검토해 보면 용량이 37~73%까지로 과잉 설계되어 있다. 또 이 표에서도 수위(차)가 줄어 들 때 전류의 변화가 10~20% 이상 감소되는데 이 점을 설계시 고려하지 않고 있다.

따라서, 본 시스템에서는 그림 1과 같이 수위(차)에 따라서 효율(%), 유량(m³/min) 및 축동력(kW)이 변화되는 펌프의 특성을 고려하여 설계할 필요가 있다. 수위차 8(m)에서 토출유량 300(m³/min)일 때 축동력 460(kW)으로 설계되었다. 그러나 수위는 5~8(m)까지 운전되어야 한다.

따라서 축동력이 변화될 수 밖에 없는데 어떤 경향성을 갖느냐가 관심 대상이다. 전기설비에서 중요하게 다루어야 될 계수가 축동력이 되는데, 이것은 수위가 변화됨에 따른 전

류의 변화로 인해 축동력이 변화된다(여기서는 345kW까지). 즉, 수위(차)가 적을수록 같은 펌프이지만 축동력이 적어진다(그림 1 참조). 이 점을 필자는 부하율이라는 개념으로 이해한다(표 2 참조).

3) 이론적으로 본 축동력과 전기입력 검토

수위(차)가 변화될 때의 전기입력 검토는 표 2와 같으며, 주요 사항을 들면 다음과 같다.

가) 전기적으로는 수위가 4.5~8m 범위에서 운전이 되므로 축동력(전기입력)이 81~100%까지 변화된다.

나) 전압강하는 문제되는 시점이 최종으로 펌프가 운전될 때이므로 전압강하는 개략치로 계산하여 보면 6.7% 이내가 되어 배전선로가 목표로 하는 10% 이내를 확보하게 되므로 안정하다고 할 수 있다(변압기 용량 설계에 반영됨).

3. 운전 계획

3.1 주 배수펌프 10대

(1) 자동기동(운전) - 2대 순차 운전 방식

① LL 레벨에서 2대 운전(# 1-2번)

(1대 기동후 1분후 다음 1대 기동하되 수위가 낮아지면 기동대기)

② L 레벨에서 2대 운전(# 3-4번)

(1대 기동후 1분후 다음 1대 기동하되 수위가 낮아지는 경향이면 다음 펌프(#4) 기동대기)

③ 중점 레벨 (# 5-6)부터

(기동방식 전과 같다)

④ H 레벨 (# 7-8)부터

(기동방식 전과 같다)

⑤ HH 레벨 (# 9-10)부터

(기동방식 전과 같다)

* 2대의 수위 지시값 중 상승시는 먼저 나타난 값, 하강시는 나중 값을 적용한다.

표 2. 전기입력 검토

항 목	8m 수위의 전기입력	5m 수위의 전기입력	비 고
이 론 식	$P(\text{kW}) = \frac{QH \cdot \alpha}{6.12\eta}$ Q : 유량 (m ³ /min), H : 수위 (m) η : 효율, α : 여유계수		
소요축동력 (kW)	$P_8 = \frac{300 \times 8 \times 1.1}{6.12 \times 0.80}$ = 539[kW]	$P_5 = \frac{350 \times 5 \times 1.1}{6.12 \times 0.72}$ = 436.8[kW]	기계 선정 560kW
전 기 입 력 (kVA)	· 1대당 입력 $\text{kVA}_1 = \frac{560}{0.914 \times 0.95}$ = 645	· 1대당 입력 $\text{kVA} = \frac{436}{0.914 \times 0.95}$ = 502	
변 압 기 용 량 선 정	-	· 10대 운전시 전기입력 총용량(10)×안전을+기타용량 = 502 × 10대 × 1.1 + 200 = 6,000 (kVA)	변압기 용량 6,000 kVA
전 압 강 하 검 토	· 전압강하 검토요건 - 발생시키는 9대 운전중 수위가 10.4m가 되어 마지막 1대 추가 운전 상황이 발생시 검토해야 됨 · 전압강하 계산식 (붙임 2) $\%e = (\text{최후 시동용량} + \text{기저부하용량}) \times \frac{\%Z}{\text{변압기 용량}}$ $= \left(\frac{436}{0.914 \times 0.95} \times 5.0 + 4.719 \right) \approx 6.7\%$		붙임 2 참조

(2) 수동 운전

MOSAIC PANEL 또는 CRT상의 수위 지시계로 수위를 확인하면서 가동시킨다.

단, LL 레벨이하에서는 모든 펌프가 정지되어야 하고

- ① L 레벨에서는 4~6대 운전 가능
- ② H 레벨 이상에서는 8대 이하 운전
- ③ HH 레벨 이상에서는 10대 모두 운전한다.

(3) 자동 정지

- ① 최초 기동 최초 정지(First start First stop)
- ② HH 레벨 → H, L(수위 변화의 경우)
 (10대 운전 중 H 레벨 도달시 8대 운전, L 레벨 4대 운전)단, 10초 간격으로 정지
- ③ H, L 레벨 → LL 레벨

4대 운전 중 LL 레벨 도달시 순차적으로 모두 정지(이때 계속 수위가 하강 경향이 면 LL → L도중 1분 간격으로 1대씩 정지시킨다)

(4) 운전 조건

- ① 수위 검지 시간(Sampling Holding Time)은 10~30초 사이로 결정한다.
- ② 펌프의 운전과 기동은 가급적 모든 펌프가 균등하도록 순차적으로 (#1~#10)이 되도록 프로그램 한다. 이때 고장 신호가 있으면 다음 펌프로 운전(기동 또는 정지) 신호가 전송 되도록 한다.
- ③ 레벨 신호 기준
 - L.W.L 7.40을 LL 레벨 설정(예)

LL 레벨	7.40	7.40
L 레벨	8.40	-
중 점	8.90	-
H 레벨	9.40	-
HH 레벨	10.40	10.90

- ④ 베어링 온도 정상 표시일 때 운전
- ⑤ 권선(3상) 온도 정상일 때 운전
 - 3권선의 평균치를 패널에 표시하고, 각 권선의 온도차가 2% 이상일 때 경보한다.
 - 이때 각 권선 온도의 변화(경향)가 CRT상으로 나타나게 한다.
- ⑥ 누수감지 장치 및 3E-EOCR 계전기가 정상일 때 운전

3.2 지배수 펌프(2대) 운전

(1) 운전 기동 조건

- ① 수위가 LL 레벨시 지배수 수위계 신호에 의해 1대 자동기동 운전
- ② 수위지시가 계속 L, H 레벨로 변할시 나머지 1대 기동
- ③ Mosaic Panel의 지시치나 CRT 상의 수위지시를 MCC 또는 LCP에서 수동운전

(2) 정지

- ① 지배수 수위 지시치가 H 레벨에서 L 레벨로 이동시 2대중 1대 정지한다.
- ② 수위가 LL 레벨 도달시 모두 정지

3.3 비상운전

(1) 변압기 용량 과부하시 운전(방류천 수위가 설계 수위보다 높아진 경우)

- Tie VCB 해제후 별도 TR운전 또는 병렬운전

(2) 권선온도 이상 성능 (95°C 이상)시 운전

- 각개 PUMP TRIP : 권선온도가 설정온도 이상으로 상승시 (시운전시 온도 편차 확

인하여 온도센서의 검지 편차를 고려하여 선정 바람)

4. 시스템 구성방안

시스템 구성의 핵심사항은 안전성과 합리성 확보이다. 따라서, 예비율 100% 이상, 2중화 시스템 구축, 자동화 시스템 구성을 통하여 설비운전이 되도록 하였다.

4.1 단선구성도

: 빗물펌프장 배전설비 단선결선도(그림 2)

4.2 시스템 검토

1) 변압기 용량 합리성 검토

일반적으로 제시되는 식 (1)에 따른 계산과 부하율을 적용한 결과를 보면 표 3과 같다.

2) 시스템 구성 검토

시스템 구성은 표 4와 같이 검토한다.

3) 보호시스템 검토

보호시스템은 표 5와 같이 검토한다.

5. 결론

빗물배수는 단기간(2 ~ 4일정도) 비상시 운전해야 되는 요구특성이 있으므로 설비의 안정성, 신뢰성이 중요하다. 그러므로 2중화, 안전계수 과다적용 등으로 경제성 측면의 고려는 현실적으로 부족한 감이 많다.

그러나 부족자원이 부족한 우리 현실에서 경제성 측면도 매우 중요하므로, 설계자는 빗물 펌프장시설의 요구 특성이 명확하고 단순한 점을 인식하고, 적용시스템을 앞에서 보인 것처럼 잘 검토하면 상당히 세밀한 설계가 가능하다고 본다.

따라서 본 시스템설계에서의 결론은 설계자가 펌프전동기의 전기입력이 수위에 따라 어떤 경향을 나타내느냐(부하율)에 주목해야 하며, 이 부하율을 적용하되 토목, 기계 제반 사항을 면밀히 검토하여 불합리한 설계가 되지 않도록 하여야 한다.

표 3. 변압기 용량의 검토

구 분	일반적 원칙	부하율 적용 계산	비 고
소요 축 동력	$P_{KVA} = \frac{560 \times 10 \times 1.1}{0.914 \times 0.95} + 200$ $= 7,404.7$ $\approx 7,500[kVA]$	$P_{KVA} = \frac{436 \times 10 \times 1.1}{0.914 \times 0.95} + 200$ $= 5,723.4$ $\approx 6,000[kVA]$	식(1) 참조
변압기용량비교	100%	80%	-
경 제 성	100%	80%	1.5억
인 입 공 사 비	전용선로 (100%)	일반선로 (40~50%)	지중시

표 4. 시스템 적용 검토

항 목	적 용 시 스템	내 용
변 압 기 구 성	<ul style="list-style-type: none"> · 2BANK로 구성 · 유입변압기 · 3.3kV 전압방식 	<ul style="list-style-type: none"> · 예비율 100% 적용 · 서지에 강한 품목 (안전) · 신뢰성 우선
모 선 구 성	TIE VCB 적용	모선분리 (안전성)
주 차 단 기	L.B.S(W/P.F) + VCB 적용	단순화 시스템 (신뢰성)
차 단 기 류	인출형 적용	유지보수성 확보
전 압 수 전	2회선 (상용, 예비)	신뢰성 확보
저 압 부 하 전 원	2중화, VSS 적용	안전성

표 5. 보호시스템 검토표

항 목	보 호 항 목	적 용 시 스템	비 고
전 동 기 개 별	· 누전(영상)검지	· ZCT, SGR 시스템	고압기동반
	· 서지	· 서지 보호기 (S.A)	
	· 과전류, 결상, 역상, 구속, 단락	· EOCR-3E (FDM)	
	· 기동 접촉 저항	· V.C (진공접촉기)	
	· 단락 보호	· V.C.B (진공차단기 8kA)	
	· 지상전력	· S.C (진상론텐서)	
모 선	· 고주파 보호	· S.R (직렬 리액터 6%)	모선분리가능
	· 모선보호	· TIE V.C.B	
	· 단락보호 (고압)	· V.C.B (진공차단기)	
콘 덴 서	· 단락보호 (특고압)	· 50/51N 적용	-
	· 부속전압 보호	· UVR 적용	
	· 과전류, 결상보호	· P.F/V.C 시스템 인출형	
변 압 기	· 변압기 증성점	· E2 접지	기계보호 포함
	· 변압기합	· E1 접지	
	· 차전류	· 피뢰기	
		· 비을 차등 계전기	



붙임 1. 타 배수펌프장 조사 결과표

시 설 장 소	용량/관경 (HP)	정 격 전 압	극 수	정 격 전류(A)	부하전류 (A)	전 력 사 용 현 황	비 고
부산○○ 펌프장 (수 중 형)	①700HP 8대 Ø 1,600mm	3,300V	6 극	120A	110~120A	TR용량:2500kVA-2대 계약전력:3334kW 피크전력:2153kW	051) 310-4514
	②540HP 5대 (음 궁)	"	"	90A	80~90A	TR용량:1500kVA-2대 계약전력:1817kW 피크전력:1728kW	
춘천○○○ 펌프장 (수 중 형)	①500HP 5대 Ø 1,500mm	3,300V	6 극	76A	75~80A	TR용량:3000kVA 계약전력:3000kW 피크전력:1200~2200kW	0361)253-6185
	②350HP 2대 Ø 1,100mm	460V	14 극	431A	-		
해운대 ○○○ 펌프장 (수 중 형)	①700HP 3대 Ø 1,650mm	3,300V	6 극	106A	70A 이상	TR용량:1500kVA-2대 계약전력:1900kW 피크전력:1120kVA	0551) 749-4678
	②250HP 1대 1,650mm	"	6 극	46A	30A 이상		
○○철강 공 단 배수펌프장 (수 중 형)	①500HP 3대 Ø 1,650mm	3,300V	6 극	80A	60A~70A	TR용량:1500kVA-2대 계약전력:3000kW 피크전력:864kW	0562) 289-5300
○○전동기 사 업 부	①560kW Ø 1,600mm	3,300V	14 극	140A	98~140A	-	0551)268-9682

- * 실 펌프장의 TR용량에 대비 피크전력은 37~73%까지 분포되어 있으며 여유용량이 많이 확보되어 있는 경향이다.
- * 실제 전력을 결정하는 전류 흐름의 변화가 80~100%까지 변화를 보이고 있다.
- * 배수 펌프장의 주된 부하가 펌프인데 부하율(수위변화에 따른 값으로 나타남)이 변화되므로 이 값을 고려한 시스템 설계가 바람직하다. 따라서 총 인입 변압기 용량은 각 대당 전력에 총 운전대수를 산술적으로 계산 선정하는 것은 과잉설계가 되므로 펌프의 효율 특성을 고려한 변압기 용량선정이 요구된다.

붙임 2. 최종 전동기 기동시 전압강하계산

1. 적용조건

- 주 펌프 시방 560kW
 - ① 효율 : 91.4%, 역률 : 95%, 시동계급 : 5.0(신전기 설비기술계산핸드북 P-1157참조), 수송률 : 100%
 - ② 건축 부하 용량 : 200kVA
- 변압기 시방 : 6000kVA, 6%(% 임피던스)
- 합계 부하 용량(기저 부하)
 - 기동중인 전동기 부하 + 기계 설비 + 건축 설비

$$P = \frac{436kW}{0.914 \times 0.95} \times 9대 + 200kVA = 4719 kVA$$

- 시동용량(kVA)

$$P_{10} = \frac{436kW}{0.914 \times 0.95} \times 5.0 = 502 \times 5.0 = 2510kVA$$

: 직입 기동

$$P_{10} = 1860 kVA(\text{효성전동기자료 : 65\% 리액터 기동})$$

2. 전압 강하 계산

- 전압 강하 계산식(65% 리액터 기동방식 채택)

$$\text{전압 강하}(\%) = (\text{시동용량} + \text{기저용량}) \times \frac{\%Z}{\text{변압기 용량}}$$

$$= (1860 + 4719) \times \frac{6}{6000} = 6.70\%$$

- 목표 전압 강하치(%V) = 10%V

3. 검토 결론

위의 계산 결과로 보면 6.70% 전압강하를 보이고 있으므로 매우 안정적이다.

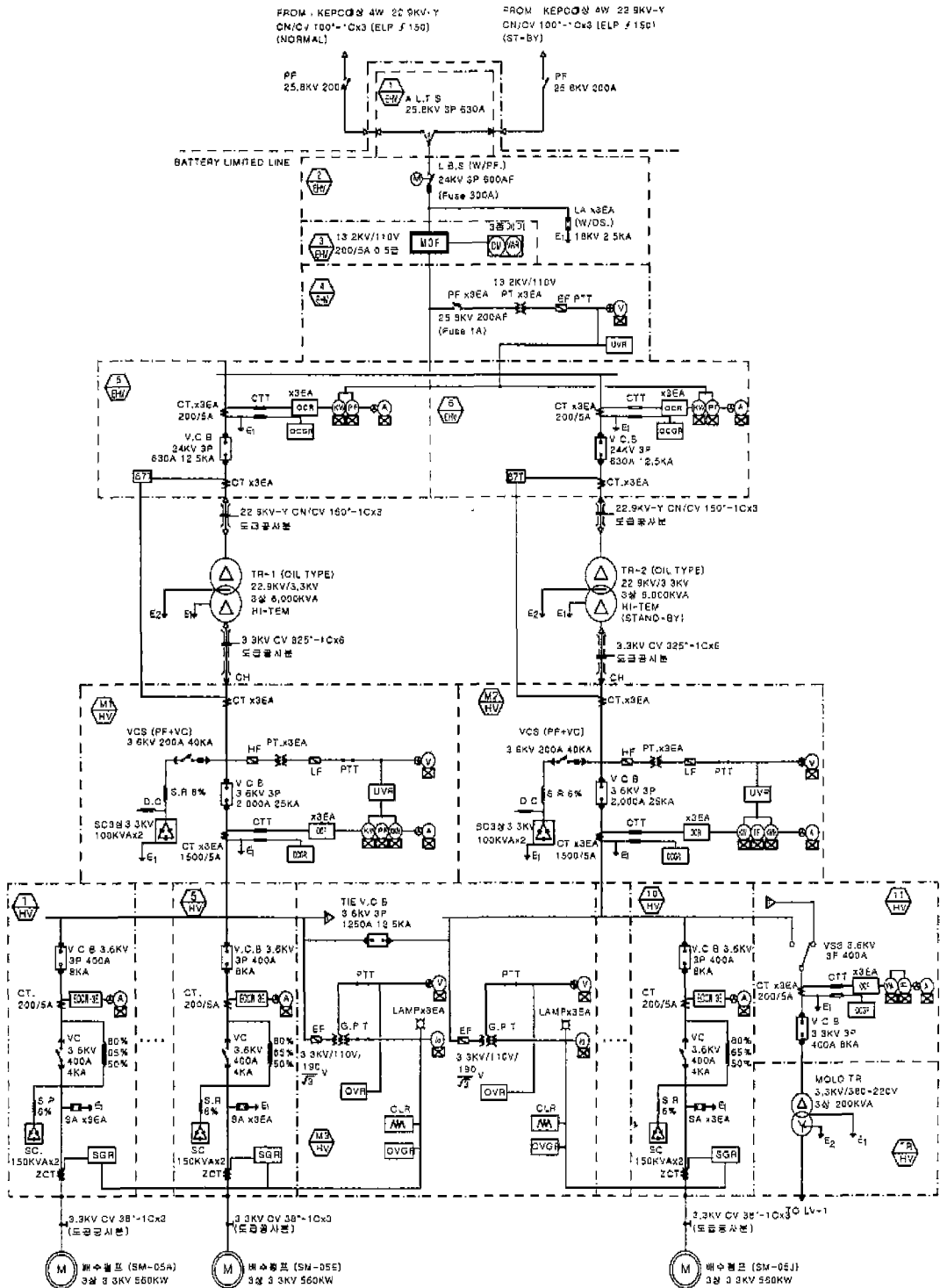


그림 2. 배전설비 단선결선도