

고속전철용 전력공급 시스템의 기술현황



황치우
(한국전기연구소)

- '75. 2 서울대학교 전기공학과 (학사)
- '83. 8 서울대학교 대학원 전기공학과 (석사)
- '89. 5 Iowa 주립대학 대학원 전기공학과 (박사)
- '81. 6 한국전기연구소 입소
- '90. 8-현재 한국전기연구소 송변전연구실장



위상봉
(한국전기연구소)

- '79. 2 서울대학교 전기공학과 (학사)
- '81. 2 서울대학교 대학원 전기공학과 (석사)
- '90. 2 서울대학교 대학원 전기공학과 (박사)
- '81. 8-'83. 5 효성중공업 기술연구소 연구원
- '83. 8-현재 한국전기연구소 선임연구원

1. 서론

전기철도를 성공적으로 운행하기 위해서는 차량, 운행, 궤도, 신호, 통신, 전력시스템의 통합적인 운용이 필수적이다. 본고에서는 전기철도 전력공급문제의 특유한 성질인 전력부하불평형, 불평형의 영향, 불평형 규제방법과 규제치, 부하불평형의 보상방법에 대하여 논의하고자 한다. 전기철도의 전력공급방법은 직류급전방식과 교류급전방식이 있으나 장거리 고속전철 전력공급방법으로 직류급전방식은 변전소의 수효가 많고 이웃하는 변전소 사이의 거리가 너무 짧아 적당하지 아니하므로 직류전기철도에 대해서는 본고에서 언급하지 아니하기로 한다.

2. 교류전기철도부하의 특성

교류전기철도 전력공급계통은 그림 1과 같은 구조로 되어 있으며 각 변전소 공급구간의 길이는 급전방법, 전압 및 철도운행밀도에 따라 25~100km가 보통이다.

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 단상변압기를 수전변전소에 채용하는 경우 상구분 사구간을 생략할 수 있어 유리함을 알 수 있다.

그림 1 (b)에서 3상2상 변환변압기를 사용하는 이유는 변전소에서 공급하는 두방면 전력의 평형을 취하여 3상계통에 평형 3상 전력이 취해지도록 하기 위함이다. 이때 전기철도 부하 수전변전소의 2차 회로설비가 2배로 되고, 수전변압기의 이용률이 떨어져 투자비가 증대되는 단점이

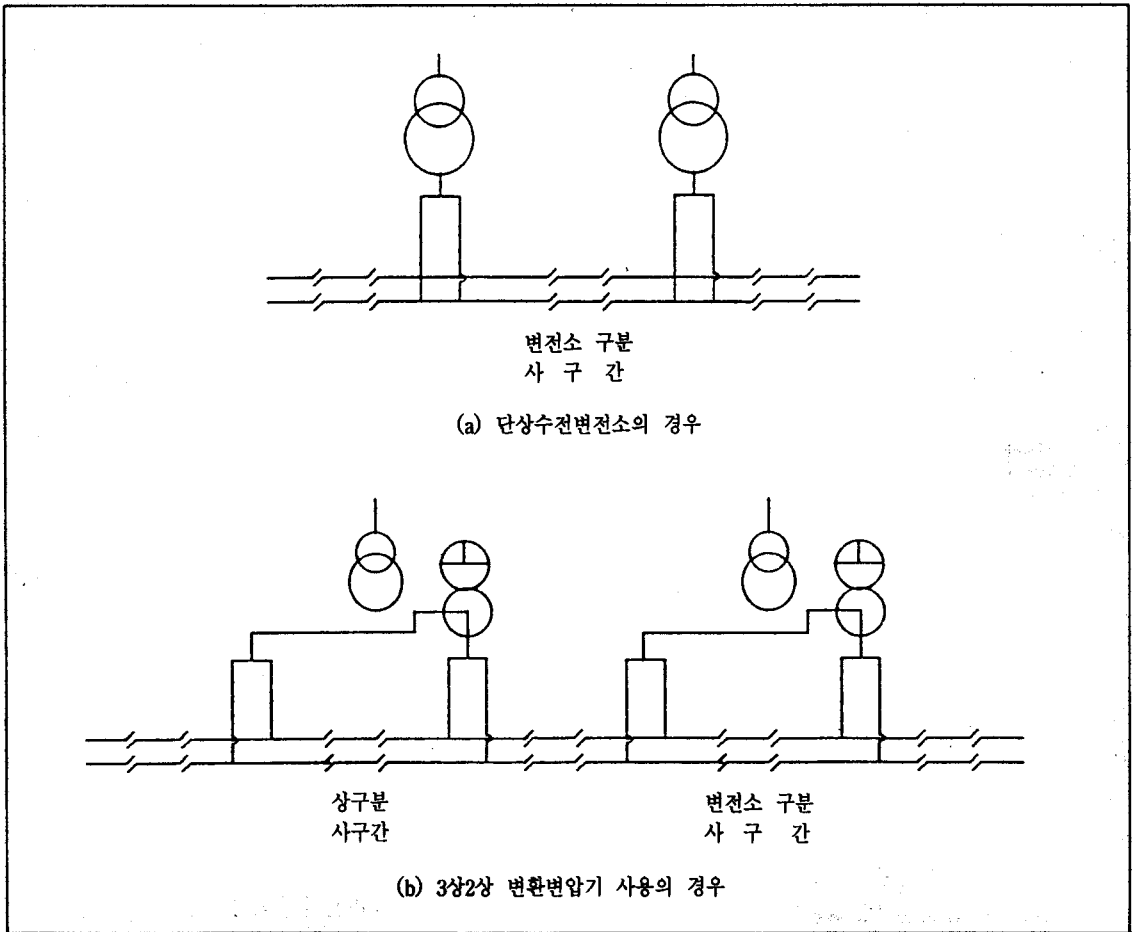


그림 1. 교류전기철도 전력공급계통

있다. 또한 철도운행측면에서 보아 사구간의 숫자가 많아 열차가 사구간 통과시 타력운동하여야 하는 구간수도 2배로 증가된다. 열차가 실제로 사구간에 진입하는 경우 견인회로의 차단기를 trip 시키고 통과하게 되는데 이는 견인전류를 팬터그래프로 차단하게 되는 경우 과도한 arc가 발생하여 팬터그래프, trolley wire를 용융시키거나 소손시키고 소음 및 전자파장해를 일으키기 때문이다.

가) 전기철도부하의 크기

전기철도부하는 차량이 고속화, 대형화함에 따라 1편성의 열차가 소비하는 전력의 크기가 계속 증대하고 있다. 표 1은 프랑스, 독일, 일본이 제외하였던 경부고속전철에 투입할 차량과 TGV,

ICE, 신간선 차량의 최대전력, 일반도시 교외전철의 평균 운행전력을 보여주고 있다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 고속전철의 1 편성당 소비전력은 일반 중저속 전철에 비하여 4~6배 정도가 됨을 알 수 있다.

평균속도 250km/H, 최대 운행밀도 20대/H의 경우 고속전철에 의한 부하요구량은 선로 1km당 1~2MW 정도가 된다. 프랑스, 독일 및 스페인의 경우 1MW/km 내외이며, 일본의 신간선 및 우리나라에 건설될 경부고속전철은 2MW/km 정도이다. 일본 및 경부고속전철의 전력요구량이 큰 주된 이유는 여객수송량이 유럽의 2배 정도이기 때문이다.

표 1. 평균 운행전력량 비교

구	분	평균전력(KW)	* 최대전력(KW)	비 고
경부고속전철계의 차량	프 랑 스	8,132	13,200	대전, 대구 15분 정차, 서울·부산 왕복 운행의 경우 (1,000명, 최고속도 300km/h 운행)
	독 일	8,012	9,600	
	일 본	14,155	14,400	
TGV-대서양			8,800	485명 최대속도 300km/h
TGV-TMST			8,800	794명 최대속도 300km/h
ICE			9,600	759명 최고속도 280km/h
우리나라 지역간 전철		2,000내외		

* 최대전력은 견인전동기의 연속정격임

나) 전기철도부하의 특성

전기철도 수전변전소에서 소비되는 전력은 일반의 부하를 소비하는 전력에 비해 그 소비패턴이 달라 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 전기철도차량은 시동, 가속, 정지가 빈번하게 반복되고 위치가 이동한다. 특히 변전소 구분 사구간 및 상구분 사구간 통과시 급격한 부하변화가 일어나게 되기 때문에 부하의 시간적인 변동이 크다. 특히 열차 1편성의 소비전력이 클 경우 부하변동의 크기가 크다. 3상계통에 대해 전압변동을 문제를 일으킬 수 있다.
- 차량에서 소비하는 전력은 1선접지 단상부하이다. 따라서 통신 또는 신호회로에 유도장해를 일으키고, 3상계통에 대해서는 부하불평형이 취해지지 아니한 경우 상불평형 문제를 일으킨다.
- 종전까지 전기철도부하의 역률은 매우 낮았다. (신간선의 경우 0.7~0.8) 역률이 낮았던 주요원인으로는 견인전동기에 직류전동기를 사용하였고 차상 정류기에 의하여 직류전동기를 구동하기 때문이었다. 최신의 고속전철차량은 유도전동기와 VVVF 사용에 의하여 역률이 거의 1.0에 가깝게 유지할 수 있다. (TGV, ICE, 최근 시험운행중의 신형 신간선 차량)
- 교류전기철도의 경우 차상에 정류시설을 탑재 하여 운행하게 되므로 고조파가 발생한다. Thyristor 위상제어에 의한 경우 많은

고조파가 발생할 수 있다. 펄스폭 변조방식의 채택에 의하여 저차의 고조파를 저감할 수 있어 이를 TGV에서도 채택하고 있다) 유럽 및 일본의 고속전철의 경우 지상 고속전철 수전변전소에 따로 필터설비를 설치하고 있지 아니하다.

3. 불평형보상방법

전항에서 설명한 바와 같이 전기철도부하는 대형의 단상 부하이므로 불평형 문제를 발생시킨다. 먼저 불평형의 영향, 불평형을 관련규격, 규제치에 대하여 알아보고 불평형보상방법에 대하여 검토하기로 한다.

가. 불평형의 영향과 규제

3상 전력계통에서 발전기, 변압기, 송전선과 배전선의 전기적 특성은 평형을 이루고 있어 평형 부하전류가 흐르게 되면 계통상태는 평형을 이룬다. 부분적으로 송전선이나 배전선의 선로정수가 불평형을 이루고 있는 경우가 있으나 불평형 정도가 매우 작아 실제적으로 평형을 이루고 있다고 취급하여도 무방하다. 전력계통에서 발전, 송전배전계통은 평형을 취하고 있으나 전기를 사용하는 말단에서는 3상 유도전동기나 3상전기로 제외하고는 모두 단상전력을 사용한다. 따라서 이러한 단상전력이 크기가 같고 역률이 같지 아니하면 부하불평형을 발생시키게 된다. 부하불평형의 영향은 크게 전기기기의 불평형 loading과 전압불평형으로 대별할 수 있다.

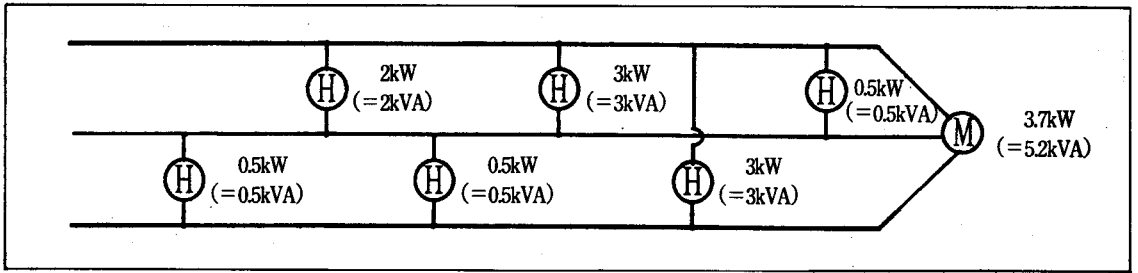


그림 2. 3상3선식의 경우 설비불평형

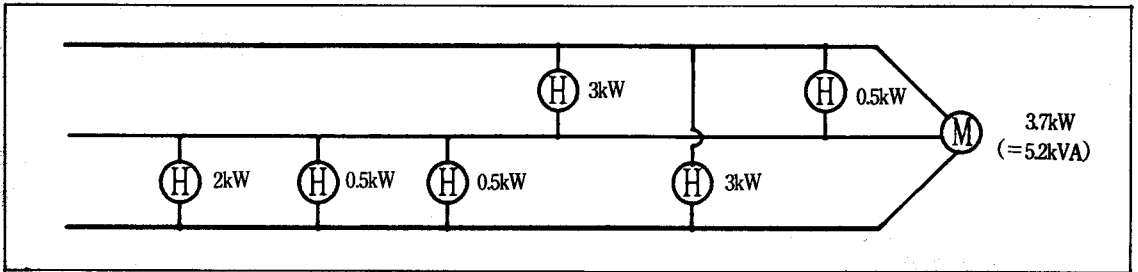


그림 3. 개선된 설비불평형을

(1) 불평형 loading

그림 2와 같은 3상3선식 계통에서 설비불평형율은 내선규정[1]에서 다음과 같이 정의 된다.

설비불평형율=

$$\frac{\text{(각상에 접속된 단상설비용량간 최대편차)}}{\text{(총 부하설비용량)} \times \frac{1}{3}} \times 100$$

내선규정에서는 설비불평형율 30% 이하로 하여 부하가 심하게 불평형되는 가능성을 미연에 방지하도록 규제하고 있다. 이 규정의 적용을 받지 아니하는 경우는 345kV 또는 154kV 수전, 저압전용 단상변압기 수전의 경우이다. 그림 2에서의 설비불평형율은 92%로 내선규정의 규제치 30%를 초과하고 있으며 그림 3과 같이 단상부하를 접속하면 설비불평형율은 10%로 되어 내선규정을 만족시킨다.

그림 2 및 3에서 알 수 있는 바와 같이 설비불평형율은 접속된 부하가 동시에 걸렸을 경우 발생할 가능성 있는 부하불평형에 대해 규제하고 있을 뿐 실제적인 부하불평형에 대해서는 규제하고 있지는 아니하다. 일반적으로 부하불평형이

발생하게 되면 3상 전력계통의 경우 변압기 또는 송전선의 용량이 과부하가 일어난 상에 의하여 제한될 수 있다. 이를 방지하기 위한 간접적인 대책으로써 각 상전력중 최대인 전력수요로 산정하는 최대수요 전력계설치를 들수 있다.

(2) 전압불평형

평형 3상계통에 불평형부하가 흐르는 경우 불평형 부하에 의한 전압불평형은 다음식으로 주어진다.

전압불평형율

$$= \frac{\text{역상전압}}{\text{정상전압}} \times 100$$

$$= \frac{\text{등가단상부하의 크기}}{\text{전압불평형율을 산정하는 지점의 3상단락용량}} \times 100$$

..... (1)

여기서 등가단상부하는 3상 불평형의 경우와 scott 결선변압기 사용의 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\text{(등가단상부하)} = \left\{ \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right\} W_{ab} - W_{bc} + \left\{ \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right\} W_{ca}$$

.....(2)

단 W_{ab} = ab 상간의 부하
 W_{bc} = bc 상간의 부하
 W_{ca} = ca 상간의 부하

$$\text{(등가단상부하)} = |W_T - W_M| \text{(3)}$$

단 W_T = T좌에 걸리는 부하
 W_M = M좌에 걸리는 부하

전압불평형을 구하는 식으로부터 미루어 알 수 있는 바와 같이 크기의 등가단상부하라 할지라도 전압불평형을 산정지점의 3상 단락용량이 크면 클수록 전압불평형률이 저하한다.

전압불평형률이 발생하게 되면 일반적으로 3상권선을 가지는 회전기는 모두 영향을 받는다고 할 수 있으며 부하불평형에 의해 가장 영향받는 기기는 3상 유도전동기이다. [2]. 즉, 유도전동기에 비해 발전기들은 3상 고장용량이 매우 큰 지점에 위치하게 되어 특정지역에서 발생한 부하불평형에 의한 전압불평형은 어느 특정지역으로 국한되는 관계상 큰 피해를 입지 않게 된다. (그림 4 참조)

표 2와 그림 5는 전압불평형에 의한 전동기의 특성저감을 나타내고 있다. [3], [4].

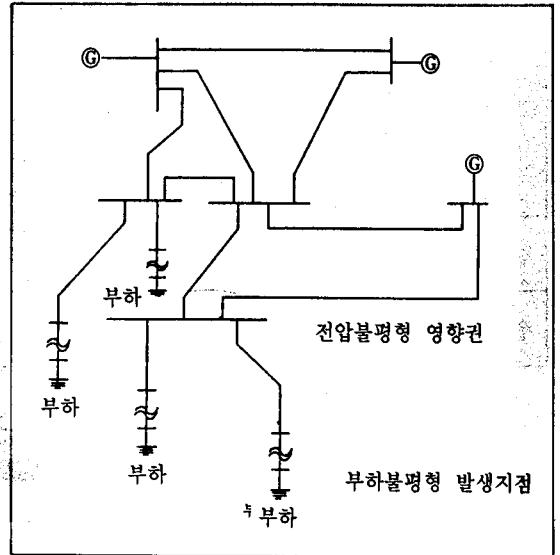


그림 4. 부하불평형에 의한 전압불평형 영향권

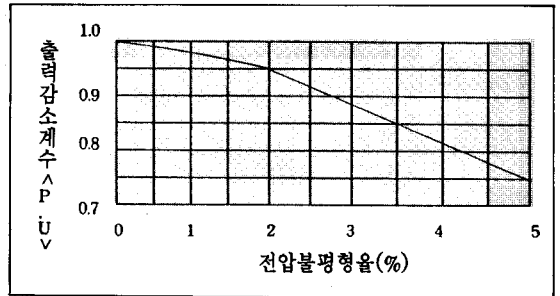


그림 5. 중형 유도전동기의 전압불평형에 의한 출력감소계수

표 3은 각국의 전압불평형을 규제치를 나타내고 있다.

표 2. 전동기의 전부하상태에서 전압불평형의 영향

전압불평형(%)		0	2.0	3.5	5.0
역상전류(%)		0	15	27	38
고정자 실효치 전류(%)		100	101	104	107.5
손실증가 (%)	고정자 평균	0	2	8	15
	고정자 최대치	0	33	63	93
	회전자	0	12	39	76
	전동기(회전자+고정자)	0	8	25	50
온도상승 (°C)	Class A	60	65	75	90
	Class B	80	86	100	120

표 3. 각국의 전압불평형을 규제치

	규 제 치	근 거	비 고
프랑스	①계통전체에 대하여 2% 미만(10분 평균) ②하나의 수용가에 대하여 1%미만(10분 평균)	IEC-34-1 회전기 정격과 성능	평형전압의 정의에 근거함
일 본	2시간 평균 3%이하	전기설비기술기준 272조 및 고시47조	너무 느슨한 규정으로 기술적의미 없음
우리나라	2시간 평균 3%이하	전기설비기술기준 275조 및 고시51조	너무 느슨한 규정으로 기술적의미 없음

표 4. 변압기에 의한 부하평형화 방법

구 분	평 형 조 건	비 고
3상2상 변환변압기	2상으로 분할된 2차 부하가 서로 역률이 같고 크기가 같아야 함	등가단상부하의 최대크기는 3상2상 변환변압기 용량의 1/2 정도가 된다. 일본, 우리나라에서 많이 사용
3상변압기	3상의 각 상별 2차 부하가 서로 역률이 같고 크기가 같아야 함	이 방법은 3곳으로 떨어진 전기철도부하를 공급하기 위한 송전선로의 건설이 필요해 특별한 경우가 아니면 채택되지 아니한다. 등가단상부하의 최대크기는 3상 변압기 용량의 1/3 정도가 된다.(영불해협 횡단부에 불평형보상장치와 함께 사용되고 있음)
V결선방식	평형은 취해지지 아니한다. 단 2차측 부하가 평형되는 경우 전압불평형이 1/2로 감소한다.	완전평형은 취해지지 아니하므로 전원단락용량이 큰곳에서 사용될 수 있는 방법이다.(프랑스에서 사용되고 있는 방법임)

표 2와, 그림 5를 참조하여 보면 전압불평형을 규제치 3%(2시간 평균)는 전동기의 온도상승을 20℃, 전동기손실 20%, 출력감소 12%를 일으킬 수 있어 불합리하다고 할 수 있어 개선이 요구 된다.

나. 전압불평형 억제대책

전압불평형을 억제하기 위한 대책에 대하여 알아보기로 한다.

(1) 단락용량 증대에 의한 방법

부하불평형에 의한 전압불평형은 전압불평형을 규제하는 지점의 단락용량에 반비례 한다. 따라서 전압불평형을 낮추기 위해서는 수전지점의 선택이 자유로울 경우 전원단락용량이 큰지점으로 수전지점을 결정한다. 다만 전원변전소까지의

송전선 건설비가 문제될 수 있으므로 경제성을 검토하여 결정하여야 한다. 이방법은 유지보수가 적게들어 운용자측에서 볼때 가장 바람직한 방법이나 실제적으로 추진하기가 어려운 경우가 많다.

(2) 변압기에 의한 방법

전기철도에서 사용하는 전력은 단상이며 이 단상부하에 의해 부하불평형이 발생하여 전압불평형이 발생한다. 3상2상 변환변압기 또는 3상변압기를 사용하여 2차의 부하를 평형시켜줌으로써 3상측의 부하를 평형화한다. 다만 이 방법은 2차측의 부하가 평형 되는 것을 조건으로 하고 있으므로 부분적으로 효과가 있는 방법이다. V결선방식은 단상변압기 2대를 V결선하여 변압기

2차측의 부하가 평형을 이루는 경우 V결선 1상에만 걸리는 정도의 전압불평형을 일으키는 방식이다. 표 4는 변압기에 의한 부하평형화 방법에 대해 설명하고 있다.

그림 6은 변압기에 의한 전압불평형 억제방법을 나타내고 있다.

(3) 불평형보상장치에 의한 방법
최근 전력용반도체소자의 발달에 의하여 정지

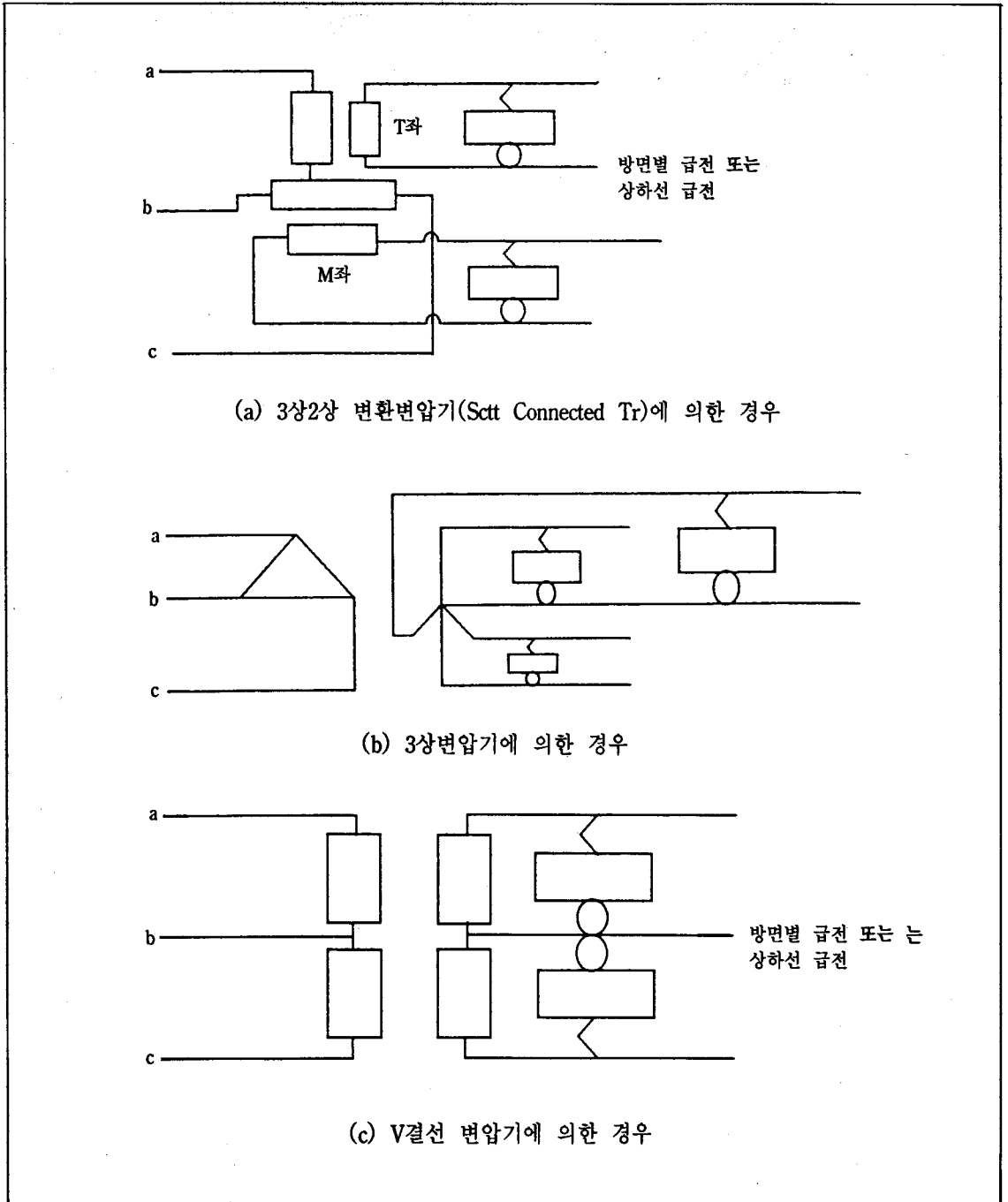
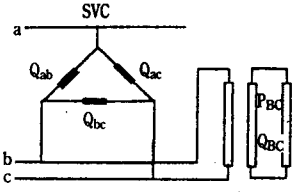
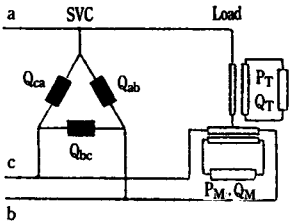
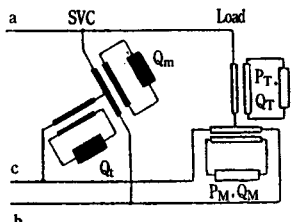
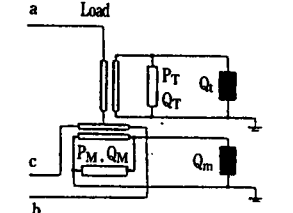


그림 6. 변압기에 의한 전압불평형 억제방법

표 5. 불평형보상장치 주회로도와 동작무효전력 용량 [6], [7]

구 분	회 로 도	동작용량및특성
3상 SVC(a)		$Q_{ab} = \frac{P_{bc}}{\sqrt{3}}$ $Q_{bc} = -Q_{bc}$ $Q_{ca} = \frac{P_{bc}}{\sqrt{3}}$ <ul style="list-style-type: none"> • 3상측 전압변동을 평형시키고 역률 100% 보상가능 • 단상변압기 사용가능
3상 SVC(b)		$Q_{ab} = -\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \cdot Q_T + \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot (P_M - P_T)$ $Q_{bc} = \frac{(Q_T - 3 \cdot Q_M)}{\sqrt{3}}$ $Q_{ca} = -\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \cdot Q_T - \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot (P_M - P_T)$ <ul style="list-style-type: none"> • 3상측 전압변동을 평형시키고 역률 100% 보상가능
변위상 SVC (c)		$Q_t = \frac{\{-Q_T - Q_M + \sqrt{(P_T^2 + Q_T^2)} - \sqrt{(P_M^2 + Q_M^2)}\}}{2}$ $Q_m = \frac{\{-Q_T - Q_M - \sqrt{(P_T^2 + Q_T^2)} - \sqrt{(P_M^2 + Q_M^2)}\}}{2}$ <ul style="list-style-type: none"> • 동작용량 저감가능 • 부하역률이 86.6%일때 3상측 전압변동을 평형시키고 역률 100%로 보상가능 • 동해 신간선 암각변전소에 100MVA급 시설
단상 SVC(d)		$Q_t = -Q_T$ $Q_m = -Q_M$ <ul style="list-style-type: none"> • 동작용량 3방식중 최소 • 유효전력에 대해서는 평형화 불능 • 급전계통의 대책이며 부하역률이 나쁠때 유효한 대책임 • 동해 신간선에 신간선부하 무효전력 보상용으로 시설

형 무효전력 보상장치가 개발되어 상용화 되고 있다. 정지형 무효전력보상장치는 전력계통의 안정도 향상, 전압안정도개선 및 부하보상용으로 사용되고 있으며 부하보상의 한 형태로서 불평형 보상에 사용될 수 있다. 표5는 급전회로별로 채택될수있는 불평형보상장치를 나타내고있다. [5]

표 5에서 (a) (b)에 나타낸 불평형보상장치에 사용된 SVC의 동작용량은 유효전력을 평형화시키고 역률을 1.0로 하기 위한 용량이다. 표 5 (c)와 (d)에 나타낸 보상장치는 일반적으로 3상을 평형화 시키고 동시에 역률을 100%로 유지시킬 수 있으나 부하 역률이 86.6% (무효전력이 유효전력의 58%) 정도일때 동작용량을 저감시킬 수 있는 유효한 대책이다. 경부고속전철에 제의된 차량의 역률은 거의 100%이므로 표 5 (c)와 (d)에 나타낸 보상장치는 효과가 낮을 것을 예측되므로 표 5 (a)와 (b)의 보상장치를 사용하여야 할 것이다. 전술한 바와 같이 표 5에 나타낸 보상용량은 완전 평형화하고 역률을 100%로 하기 위한 값이어서 매우 큰 값이다. 부분보상을 하여 모든 운전조건에서 원하는 평형조건을 최소의 보상용량을 가지고 성취할 수 있는가에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

전기철도부하의 특이성과 관련하여 전압불평형의 영향, 관련규제규정, 불평형보상방법에 대하여 기술하였다. 전기철도부하는 다른부하에 비하여 대형이므로 그 영향이 일반 수용가 부하에 비하여 보다 광범위하고 크다. 그러나 일반 수용가 부하의 경우도 수용가 자신의 부하불평형에 기인한 전압불평형의 피해를 입을 수 있고 수전변압

기 용량증대에 의한 기본요금의 증가가 발생할 수 있다.

전력제어회로에 많이 쓰이는 반도체전력소자를 이용한 전력부하불평형보상장치의 사용에 의해 부하불평형을 효과적으로 보상할 수 있으리라고 예측되므로 경부고속전철의 전력공급시스템의 초기기본설계에서 부터 이 부분의 연구가 필요할 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

- [1] "내선규정", 사단법인 대한전기협회 1992.
- [2] R. F. Woll, "Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors", IEEE Trans. IA, Vol. IA-11, No. 1, Jan/Feb 1975
- [3] John R. Linders, "Effects of Power Supply Variations on AC Motor Characteristics", IEEE Trans. IA, Vol. IA-8, No. 4, Jul/Aug 1972
- [4] NEMA MG-1-1987 MG1-14.35, "Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Polyphase Induction Motors"
- [5] 한국전기연구소 "경부고속전철용 전력공급의 비용절감방안연구(최종보고서)", 1992. 10
- [6] L. Gyugyi, R. A. Otto, T. H. Putman, "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators", IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1978
- [7] M. Kamija, H. Takagi, "신간선 대책의 무효 전력보상장치", 일신전기기보 Vol. 29, No. 4, 1984. 11