



철도 전력설비 노후도 판정 기술



강현일 교수 (한밭대학교 전기공학과)



1. 서론

최근 대중교통 수단의 안전에 대한 관심이 매우 높아지고 있으며 일일 기준 수백만 명이 이용하는 철도시스템 또한 예외는 아닐 것이다. 철도를 구성하는 여러 시스템 중에서도 전동차에 전력을 공급하는 전력설비는 안정적인 철도의 운행에 중요한 부분을 차지한다. 전력설비 중 전차선과 조가선은 전동차에 전력을 공급하는 전차선로의 구성요소로서 원활한 전력을 공급하기 위해서는 신뢰성 있는 성능을 확보하고 있어야 한다. 그러나 장시간 사용함에 따라 노후화가 진행되어 고장 시 큰 사고로 이어질 수 있기에 상시 점검하여야 한다. 따라서 교체 시기가 도래한 전차선과 조가선의 노후도를 사전에 판정하여 등급에 따라 유지보수를 함으로써 사고를 미리 예방할 수 있는 기술이 필요하다. 이에 본고에서는 철도 전력설비 노후도 판정 기술에 대해 고찰하고자 한다.

2. 철도의 전력설비 노후도 판정 요소인자

2.1 수명예측 요소인자

전차선의 수명을 결정하는 요소로는 판토크라프 (Pantograph)의 압상력, 집전전류, 운전

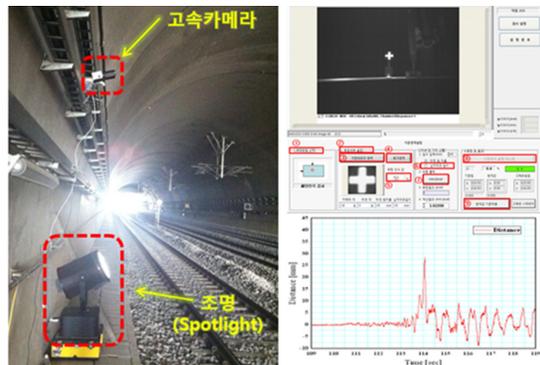


그림 1. 전차선의 압상력 측정 (한국철도기술연구원).

속도, 접촉력의 변동과 이선, Pantograph의 구조와 개수, 판토크라프 슬립판의 특성, 온도, 마모율과 이용률 등이다. 그중에서도 전차선의 마모는 전류가 상대적으로 작은 교류구간에서는 기계적 마모가 많고, 직류구간에서는 전기적 마모가 많이 발생한다. 기계적 마모는 판토크라프 (Pantograph)와 전차선간의 기계적 마찰에 의해 발생되고 판토크라프의 압상력, 슬립판의 재질, 마찰 계수 등에 의해 영향을 받는다. 전기적 마모는 팬토크라프와 전차선 사이에 발생하는 아크 (arc)가 주요한 원인이다. 조가선은 부식, 기계적 진동, 마찰 등을 받아 항장력이 저하하기 때문에 내식성, 내마모성 및 기계적 강도가 크고, 도전성이 높은 특성을 필요로 한다. 조가선의 특성 중 기계적



강도에 의한 인장하중이 가장 중요한 특성이지만 전차선용 전선은 단독으로 구성되는 것이 아니고, Drop Bar 또는 Hanger Ear 등과 같이 구성되기 때문에 기계적 특성, 마모 특성, 이종금속과의 전기적 결합, 화학적 접촉에 의한 부식특성이 고려되어야 한다 [1-3].

2.2 판정요소인자에 따른 5단계 등급

전차선로 구성 요소 중 전차선과 조가선을 요소별로 총 5단계로 구분하였으며, 우수에서 불량 등급으로 갈수록 보수가 필요한 상태라고 볼 수 있다.

현재, 전차선로 구성 요소에 대한 세분화된 등급 규정이 없는 상태이기 때문에 전차선, 조가선의 열화인자에 해당하는 항목을 종합적으로 평가하여 우수, 양호, 보통, 주의, 불량인 5단계로 등급화시켰다. 노후화인자인 압상력, 마모율, 운전속도, 전차선의 온도 등을 1일, 1주, 1개월 간격으로 데이터를 측정한다. 측정된 데이터에 변화가 없을 시 다시 반복적으로 데이터를 측정한다. 만약 3회 측정 시까지 변화가 없다면 노후도는 우수로 판정한다. 각 열화인자의 데이터를 분석하여 가중치에 따라 5단계인 우수·양호·보통·주의·불량으로 판별한다. 우수 상태는 보수 및 교체가 필요하지 않은 상태이고, 양호는 부분 보수, 보통은 부분 보수 및 교체, 주의는 전면보수, 불량은 전면 교체 상태를 의미한다.

그림 2는 철도 전력설비 중 전차선과 조가선에 대한 노후도를 평가하기 위하여 전력설비 별 각 열화인자에 따른 전철전력설비 노후도 평가방법 이다. 전차선의 주요 열화인자는 마모, 온도 및 사용이력이며, 조가선의 주요 열화인자는 기계적 강도, 도전율, 선펽창계수 및 사용 이력 등이다 [4,5].

2.3 열화인자별 가중치

전차선과 조가선의 상태등급별 가중치는 표1과 같다. 가중치가 '0' 에 가까울수록

표 1. 판정요소인자에 따른 5단계 등급.

5단계 등급	판정 요소인자
우수	신제품 수준의 최상의 상태
양호	양호한 상태
보통	경미한 손상이 있는 보통의 상태
주의	노후화로 보수가 필요한 상태
불량	심각한 노후화로 즉각 사용금지하고 교체가 필요한 상태

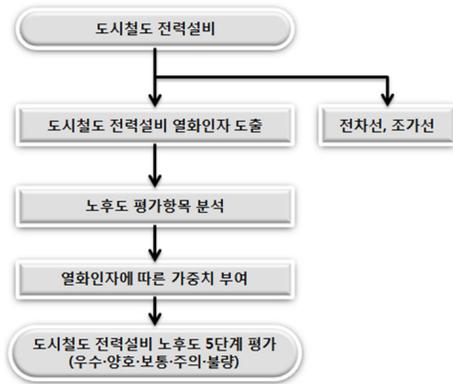


그림 2. 전철전력설비 노후도 평가방법.

표 2. 등급별 가중치.

가중치 구분	가중치
a	0
b	0.05
c	0.1
d	0.35
e	0.5
합계	1

표 3. 등급별 판단기준.

가중치 구분	판정 기준
우수	0~0.15
양호	0.16~0.25
보통	0.26~0.35
주의	0.36~0.45
불량	0.46~0.5

노후도에 영향을 미치는 영향이 없고, 0.5로 갈수록 노후화가 된 것으로 가정하여 가중치를 산정하였다. 이때 가중치의 합계는 1이 되도록 하였다. 각 요인별로 가중치를 고려한 요인별 상태등급에 대하여 점수화시키기 위



하여 전차선로 구성요소의 등급별 판단 기준을 우수에서 불량으로 5단계로 구분하여 점수화시켰다. 점수가 0.5에 가깝게 될수록 노후도가 커진다는 의미이다.

3. 전차선과 조가선의 노후도 알고리즘

3.1 전차선 (110 (mm²) 기준)

- (1) 전차선의 열화인자 : 전차선의 수명을 예측하기 위해 전차선의 마모와 온도를 열화인자로 설정하였다.
- (2) 전차선의 마모 (잔존지름 12,340 mm 기준)(표 4)
- (3) 전차선의 온도 (외부 온도 40℃, 허용 온도 90℃ 기준)(표 5)
- (4) 전차선의 사용 년 수 (23년 기준)(표 6)
- (5) 오염도가 높은 지역 (공장, 해안 등)에 대해선 60%~70%의 가중치를 부여한다.
- (6) 전차선의 지표 산정 (표 7,8)

예를 들어 위 표와 같이 2개의 전차선에서 5번에 걸쳐 조사한 마모상태, 온도가 표와 같다고 가정하며, 1번 전차선의 경우 0.03이 되고, 2번 전차선의 경우에는 0.163으로 2번 전차선은 아직은 양호하나 노후가 더 심하다고 볼 수 있다. 또한 지표 산정 기준에 e등급이 한 개라도 있을 경우 불량으로 판정한다.

표 4. 전차선의 마모에 따른 노후화.

등급	상태	판정 기준	기타
a	최상의 상태	12,340 mm ~ 11,373 mm	
b	양호한 상태	11,372 mm ~ 10,405 mm	
c	보통의 상태	10,404 mm ~ 9,437 mm	
d	보수 및 보강이 필요한 상태	9,436 mm ~ 8,469 mm	
e	즉각 교체가 필요한 상태	8,468 mm ~ 7,500 mm	

표 5. 전차선의 온도에 의한 노후화.

등급	상태	판정 기준	기타
a	최상의 상태	≤ 59℃	
b	양호한 상태	60℃ ~ 69℃	
c	보통의 상태	70℃ ~ 79℃	
d	보수 및 보강이 필요한 상태	80℃ ~ 90℃	
e	즉각 교체가 필요한 상태	> 90℃	

표 6. 전차선의 사용년수에 의한 노후화.

등급	상태	판정 기준	기타
a	최상의 상태	≤ 4.5	
b	양호한 상태	4.6 ~ 9.2	
c	보통의 상태	9.3 ~ 13.8	
d	보수 및 보강이 필요한 상태	13.9 ~ 18.3	
e	즉각 교체가 필요한 상태	18.4 ~ 23	

표 7. 1번 전차선 지표 산정

조사 횟수	전차선의 마모	전차선의 온도	사용년수	합계	평균	노후도 등급
1	a	b	a			
2	a	b	a			
3	a	b	a			
4	b	c	a			
5	b	c	a			
합계	0.1	0.35	0			
평균 (건전도율)	0.02	0.07	0	0.09	0.03	우수

표 8. 2번 전차선 지표 산정.

조사 횟수	전차선의 마모	전차선의 온도	사용년수	합계	평균	노후도 등급
1	b	c	c			
2	c	c	c			
3	c	d	c			
4	c	d	c			
5	d	d	c			
합계	0.7	1.25	0.5			
평균 (건전도율)	0.14	0.25	0.1	0.49	0.163	양호



3.2 조가선 (90 (mm²) 기준)

※ 조가선의 열화인자

조가선의 열화 특성을 분석하기 위해 조가선의 동적 거동에 의한 응력을 열화인자로 설정한다 [6].

$$\log S_{amp} = a + b \log N_f \quad (1)$$

여기서, a는 $\log N_f = 0$ 일 때의 절편이며, b는 직선의 기울기이다. N_f 는 피로시험 중 시편이 파단되는 파괴 사이클 수 (Number of cycles to failures)이며, S_{amp} 는 응력진폭 (Amplitude stress)을 나타낸다.

$$S_{amp} = 10a \times N_f^b \quad (2)$$

가 된다. 따라서 피로수명은

$$N_f = 10^{-a/b} \times S^{1/b} \quad (3)$$

연선 조가선의 피로 하중에 의한 수명주기는 표 10과 같다 [7].

조가선의 권장 교체 주기는 23년으로 표 10에 나타낸 바와 같이 최대 하중 2,148 (kgf) 일 경우와 같다. 예를 들어 2,148 (kgf)의 경우 팬터그래프의 통과 횟수가 8,110,546회로 1년에 100,000회일 경우 81년이다. 따라서 피로수명 식 (3)과 파괴강도를 바탕으로 다음과 같은 조가선의 노후화 등급을 나누었다. 또한 지표산정 기준에 e등급이 한 개라도 있을 경우 불량으로 판정한다.

- (1) 오염도가 높은 지역(공장, 해안 등)에 대해선 60%~70%의 가중치를 부여한다.
- (2) 조가선의 지표 산정 (표 13)
- (3) 지표산정 기준에 e 등급이 한 개라도 있을 경우 불량으로 판정한다.

표 9. 신제품과 사용제품의 a와 b값.

형태		a	b
소선	new	3.51	-0.37
	used	3.47	-0.35
연선	new	2.44	-0.20
	used	2.38	-0.20

<자료>: 김용기, 장세기, '사용환경에 따른 조가선의 피로수명 예측', 2005.

표 10. 연선 조가선의 하중에 따른 수명주기.

Preload (kgf)	Pmax (kgf)	Nf (cycles)
1,000	2,910	87,234
	2,751	175,943
	2,620	380,487
	2,473	500,345
	2,297	820,570
	2,148	2,015,200
	2,005	5,200,300
	1,911	7,008,235
	1,855	8,110,546
	1,771	10,532,546
	1,735	11,945,235

<자료>: 김용기, 장세기, '사용환경에 따른 조가선의 피로수명 예측', 2005.

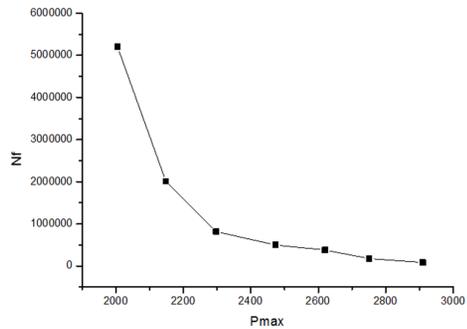


그림 3. 하중에 따른 수명 주기.

표 11. 변동응력 11.11 (kgf/mm²)일 때, 공칭단면적 90 (mm²) 조가선의 응력에 의한 노후화.

등급	상태	판정 기준	기타
a	최상의 상태	≤ 2,005 kgf	
b	양호한 상태	2,006 kgf ~ 2,147 kgf	
c	보통의 상태	2,148 kgf ~ 2,296 kgf	
d	보수 및 보강이 필요한 상태	2,297 kgf ~ 2,620 kgf	
e	즉각 교체가 필요한 상태	2,619 kgf ~ 2,910 kgf	

표 12. 변동응력 11.11 (kgf/mm²)일 때, 공칭단면적 90 (mm²) 조가선의 사용 년 수에 의한 노후화.

등급	상태	판정 기준	기타
a	최상의 상태	≤ 4.5년	
b	양호한 상태	4.6년 ~ 9.2년	
c	보통의 상태	9.3년 ~ 13.8년	
d	보수 및 보강이 필요한 상태	13.9년 ~ 18.3년	
e	즉각 교체가 필요한 상태	18.4년 ~ 23년	

표 13. 조가선 지표 산정.

조사 횟수	조가선의 응력	사용 년수	합계	평균	노후도 등급
1	a	b			
2	a	b			
3	a	b			
4	b	b			
5	b	b			
합계	0.1	0.25			
평균 (건전도율)	0.02	0.05	0.07	0.035	우수

4. 결론

2013년 기준 약 5천만 명이 이용한 KTX와 같은 철도시스템에서도 설비의 노후화로 인하여 사고에 노출되어 있어 사전에 전력설비의 잔여 수명을 예측하여 유지 보수하는 기술은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이에 본고에서 제안한 철도 전력 설비의 노후화 판정 기술은 현장에서 유지 보수하는 기술자와 운영자에게 매우 유용하게 사용되리라 기대된다.

참고 문헌

- [1] 김희대, "전기철도공학개론", 태영문화사
- [2] 백남욱, "철도공학 핸드북", 골든벨
- [3] 김선희, "철도시스템의 이해", 자작야카데미
- [4] 강경호, "도시철도 기술자료집", 서울메트로
- [5] 조영현, 권삼영, "전차선의 수명을 기초로 한 압상력 상한에 관한 검토", 대한기계학회 재료 및 파괴부문 추계학술대회 및 파손방지기술 산학연 연합회 워크숍 논문집, pp.138-142, 2004

- [6] 김용기, 장세기, 조성일, "가설환경에 따른 조가선의 피로수명특성", 철도학회논문집, Vol.6 No.1, pp.21-28, 2003
- [7] 장세기, 김용기, "사용환경에 따른 조가선의 피로수명 예측", 철도학회논문집, Vol.8 No.6, pp.525-532, 2005

저자약력



성명 : 강현일

◆ 학력

• 2003년
성균관대학교 대학원
전기전자 및 컴퓨터공학부
공학석사

• 2007년
성균관대학교 대학원
전기전자 및 컴퓨터공학부
공학박사

◆ 경력

• 2011년 - 현재

한밭대학교 전기공학과 조교수

