

경전철 급배전 계통 신뢰도평가에 관한 연구

장중구 * 서상진 ** 이민용 **
 상진기술(주) / 서울대학교 * 상진기술(주) **

A Study on the Reliability Evaluation for Light Rail Train Power System

Choong-Koo Chang * Sang-Jin Suh ** Min-Yong Lee **
 Sangjin Engineering Company / Seoll College * Sangjin Engineering Company **

Abstract - 새로운 대중교통수단의 하나로써 경전철을 도입중이거나 계획중인 도시가 늘어나고 있는 추세이다. 경전철은 장거리 선로상에서 이동하는 부하라는 관점에서 전기철도 및 지하철과 유사성을 가지고 있으나, 전철 설비가 도심의 지상에 설치되는 점과 역사설비가 비교적 간단하며 선로의 공장이 지하철에 비하여 짧은 경우가 대부분인 경우가 특징이다. 본 논문에서는 경전철을 안전하고 효율적으로 운행하기 위한 전제조건이 되는 전력 계통의 신뢰성확보를 위한 경전철 전력계통 신뢰성평가 및 최적화방안을 도출하였다. 계통공급신뢰도는 확률이론을 이용하여 정량적으로 산출할 수 있으며 정량적 신뢰도 산출법을 이용 개별 계통구성요소의 신뢰도 특성으로부터 전체계통의 신뢰도를 계산할 수 있다. 이로써 신뢰도 측면과, 설치 및 유지보수 비용을 고려한 최적의 계통구성방안이 도출된다.

1. 서 론

신뢰도를 정의하는 방법에는 여러가지가 있을수 있겠으나, 다음의 두가지 지표를 제시한다

- (1) 부하 고장율
- (2) 한 고장당 지속시간

확률론적인 접근법으로 효율도(Availability)를 제시 할 수도 있다. 효율도란 일정 시간을 정해놓고 그 시간중 임의의 시점을 지정하였을 경우, 해당부하가 고장상태에 있을 확률이다. 즉, 수식적으로는 '고장시간/노출시간' 이다. 노출시간이란 부하가 정상적으로 작동하거나 혹은 고장 또는 수리중인 시간의 합이다. 그러므로 효율도=1-(고장율*고장당 지속시간)이 된다. 효율도보다 고장율과 고장당 지속시간을 제시하는 이유는 같은 효율도라 할지라도 단위기간당 비교적 많은 고장횟수와 적은 지속시간을 가지거나, 혹은 적은 고장횟수와 긴 지속시간을 가질 수 있기 때문에 부하 운전에 대한 좀 더 구체적인 신뢰도를 제시하기 위함이다.

2. 본 론

2.1 고장의 정의

부하의 고장을 정의하는 여러가지 방법중에는 다음의 네가지가 있다.[2]

- (1) 1cycle이상의 정전
- (2) 10cycle이상의 정전
- (3) 5초이상의 정전
- (4) 2분이상의 정전

본문에서는 세번째 '5초 이상의 정전'을 부하고장으로 간주한다.

2.2 신뢰도 산출법

부하의 신뢰도 산출에는 계통축약법과 Minimal-Cutset 을 이용한다.

2.2.1 계통축약법[3]

복잡하게 얽혀있는 계통의 신뢰도를 산출하기 위해서는 먼저 그 계통을 구성하는 각 요소의 신뢰도 지수를 구하여 이를 합성함으로써 계통을 점차 단순화 시켜 원하는 부하의 신뢰도 지수를 알 수 있다. 이를 위하여 다음의 수식이 사용된다.

(1) 직렬합성

$$f_s = \sum_{Cutsets} f_{\alpha_s} \dots\dots\dots (1)$$

$$r_s = \sum_{Cutsets} f_{\alpha_s} r_{\alpha_s} / f_s \dots\dots\dots (2)$$

f_s : 종합고장율 r_s : 종합 고장당 지속시간

f_{α_s} : Cutset의 고장율

r_{α_s} : Cutset의 고장당 지속시간

$f_s r_s$: 전체고장시간

(2) 병렬합성

-2병렬 합성

$$f_{\alpha} = \lambda_i \lambda_j (r_i + r_j) \dots\dots\dots (3)$$

$$r_{\alpha} = r_i r_j / (r_i + r_j) \dots\dots\dots (4)$$

f_{α} : Cutset의 고장율

r_{α} : Cutset의 고장당 지속시간

λ_i, λ_j : 각 계통요소의 고장율

r_i, r_j : 각 계통요소의 고장당 지속시간

-3병렬 합성

$$f_{\alpha} = \lambda_i \lambda_j \lambda_k (r_i r_j + r_j r_k + r_k r_i) \dots\dots\dots (5)$$

$$r_{\alpha} = r_i r_j r_k / (r_i r_j + r_j r_k + r_k r_i) \dots\dots\dots (6)$$

f_{α} : Cutset의 고장율

r_{α} : Cutset의 고장당 지속시간

$\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k$: 각 계통요소의 고장율

r_i, r_j, r_k : 각 계통요소의 고장당 지속시간

상기의 수식을 사용하여 마치 계통의 임피던스를 합성하듯이 계통의 신뢰도를 합성하여 나갈 수 있다.

2.2.2 Minimal Cutset 이론[4]

Minimal Cutset이란 계통 구성의 일부분으로서 집합전체가 고장일 경우에만 신뢰도를 산출하려는 부하에 고장이 발생하는 최소의 집합이다. 그러므로 Minimal Cutset 내의 어느한 요소라도 고장이 아니면 신뢰도를 구하고자 하는 지점은 고장이 아니다. 원하는 지점의 신뢰도지수를 구하기 위하여는 먼저 Minimal Cutset를 구하고 각 Set내의 요소들을 병렬합성한 후 Set들은 직렬합성하면 된다. 계산상 한가지의 가정사항은 Minimal Cutset간의 공집합의 확률을 무시한다는 점이다.

Minimal Cutset 간의 합성시 고장확률은 다음식과 같다

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$$

또는,

$$P(A \cup B \cup C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cap B) - P(B \cap C)$$

$$-P(C \cap A) + P(A \cap B \cap C)$$

이상의 개수에 대해서도 마찬가지로 방식으로 전개된다. 하지만 수치적으로 공집합의 확률은 극히 적으므로 그 값을 '0'으로 간주한다.

2.2.3 고장후 스위칭을 고려한 합성[5]

병렬 합성의 확률론적인 산출시 가정사항은 MTBF (Mean Time Between Failure) ≫ MTTR (Mean Time To Repair), 즉 정상작동시간이 고장시간보다 매우 크고 또한 고장이 동시에 발생하지 않는다는 점이며 이는 꽤 적절한 가정이다. 하지만 일반적으로 고장시 스위칭을 행하는 회로에서는 스위칭 시간이 짧을 경우, 어느 한 회로에서의 고장이 부하효용도 저하에 기여하는 가치가 적으므로 동시고장의 가능성을 생각해야 하며 두 회로가 병렬급전하며 한 회로가 고장시 스위칭을 하는 방식의 신뢰도지수는 다음 수식으로 계산된다.

표1. 고장시 스위칭을 고려한 신뢰도지수[4]

Minimal Cutset	고장율	고장당지속시간
회로1 고장	λ_1	ts(절환시간)
회로2 고장	λ_2	ts(절환시간)
동시고장	$\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)$	$\frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$

그러므로 부하고장율은 표의 세 고장율의 합으로

$$f_{cs} = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)$$

고장시간은 식(2)와 같은 방식으로 산출할 수 있다. 엄밀하게 말하면 동시고장은 Minimal Cutset라고 할 수 없다. 왜냐하면 회로1 또는 회로2만의 단독고장으로도 고장지속시간 즉 스위칭시간을 발생시키기 때문이다. 하지만 개념상 상기표와 같이 동시고장도 Minimal Cutset으로 간주함으로써 3개의 Minimal Cutset의 직렬합성으로 스위칭회로의 신뢰도지수를 편리하게 구할 수 있다. 이상과 같은 산출은 회로1,2로 병렬 급전하다가 어느 한 쪽이라도 고장이 나면 스위칭 절환시간 ts를 발생하는 경우이다. 만일 정상시는 회로1로만 급전하다가 회로1의 고장시에만 회로2를 투입하는 경우는 회로2의 고장율은 시스템의 고장율에 포함되지 않으며 '회로1' 및 '동시고장'의 Minimal Cutset이 직렬로 연결된 것으로 계산하면 된다.

여기서 중요한 것은 고장에 의한 스위칭시간 ts가 매우 짧아 '0'으로 볼 수 있을 경우, 고장의 정의에서 논한대로 고장을 발생하는 최소시간보다 스위칭시간이 짧을 경우는 '동시고장'의 경우만이 남아 식(3) 및 식(4)의 병렬 합성의 경우와 같아진다는 점이다

2.3 신뢰도 지수 자료

계통 구성요소의 신뢰도 지수자료표는 아래와 같다

표2. 계통요소별 신뢰도지수[5]

구성 요소	하위분류	고장율, λ [고장횟수 /년]	고장당 지속시간, r [hour]	비고
변압기	Dry type	0.00360	153	
차단기	저압	0.00270	147	
	고압이상	0.00360	109	
배전반	Insulated	0.00170	261	
케이블	지상(600V이하)	0.00463	457	1km당
	지상(600V이상)	0.04626	40.4	1km당
	지하(600V이하)	0.01273	15	1km당
	지하(600V이상)	0.02024	95.5	1km당

2.4 계통 신뢰도 산출

2.4.1 계통구성안

다음 두가지 경전철 급·배전 계통 구성방안에 대한 신

뢰도를 평가한다

- (1) 22.9kV 수전 및 급전, 6.6kV 배전, 22.9kV수전변전소 2개소 및 연락변전소 1개소로 구성

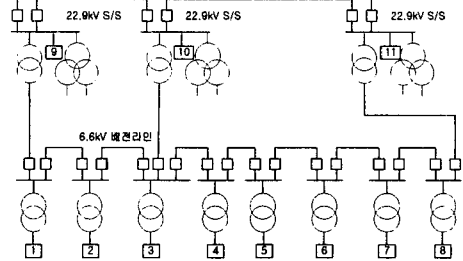


그림1. 급전·배전계통 분리방안(1안)

- (2) 22.9kV 수전, 6.6kV 급전 및 배전, 22.9kV 수전변전소 2개소로 구성

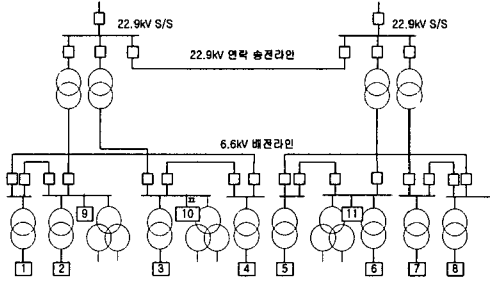


그림2. 급전·배전계통 일괄구성방안(2안)

그림처럼 각 정거장의 저압부하군을 1,2,...,8번으로 명명하고 정류기 급전모선을 9,10,11번으로 명명한다

2.4.2 신뢰도 산출 계산례

"1안"의 2번 부하의 신뢰도 산출과정은 다음과 같다.

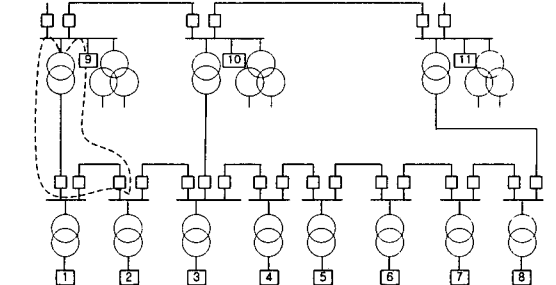


그림3. 계통축약과정

그림에서 점선으로 묶인 계통요소는 분기되는 요소사이에 모두 직렬로 연결된 요소이다.

식(1)과 (2)를 이용하여 점선내의 요소들을 직렬합성하고 마찬가지로 다른 분기점사이의 요소들도 직렬합성하면 다음과 같은 도식이 그려진다.

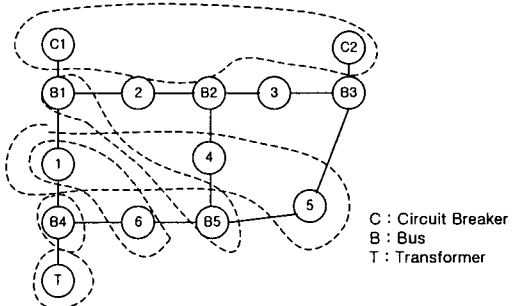


그림4. Minimal Cutsets

그림3에서 접선내의 계통요소들의 합성치가 그림4에서의 기호①로 축약된다. 접선은 Minimal Cutsets중 일부의 집합을 나타낸 것이다.

그림4의 기호를 이용하여 Minimal Cutset를 나타내면, 그림4의 Minimal Cutsets = $\{(B4),(T),(1,6),(B1,B5),(C1,C2),(B1,B3),(1,B5),(6,B1),(1,4,5),(1,4,B3)\}$ 가 된다. 신뢰도 지수자료를 이용하여 Set집합내 각 원의 신뢰도 지수를 구하면 아래와 같다

(B4)	: $f_{cs}=0.0017,$	$r_{cs}=261$
(T)	: $f_{cs}=0.0036,$	$r_{cs}=153$
(1, 6)	: $f_{cs}=0.00008,$	$r_{cs}=50.41$
(B1, B5)	: $f_{cs}=0.000000172,$	$r_{cs}=130.5$
(C1, C2)	: $f_{cs}=0.00000032,$	$r_{cs}=54.5$
(B1, B3)	: $f_{cs}=0.000000172,$	$r_{cs}=130.5$
(1, B5)	: $f_{cs}=0.0000057,$	$r_{cs}=74.38$
(6, B1)	: $f_{cs}=0.000003,$	$r_{cs}=71.15$
(1, 4, 5)	: $f_{cs}=0.00000084,$	$r_{cs}=31.12$
(1, 4, 부3)	: $f_{cs}=0.00000001,$	$r_{cs}=46.44$

산출된 값을 보면 팔호내 요소의 수가 3개인 경우 유효 숫자는 소수점 8~9자리에서 시작되고 Minimal Cutset 간의 공집합은 최소요소수가 4개이상으로 2.2절의 가정이 합리적임을 알 수 있다. 상기 값들을 식(1)과 (2)를 이용하여 합성하면 종합 고장률 및 고장당 지속시간은, 2번 배전반의 경우 : $f_s=0.005389,$ $r_s=185$ 가 된다.

2.4.3 두 급전방안의 신뢰도 비교

위와 같은 방법으로 산출한 "1안" 및 "2안"의 각지점에 대한 종합 고장률 및 종합 고장당 지속시간은 아래와 같다

표3. 산출결과표

구분	위치	고장률, f_s [횟수/year]	고장당 지속시간, r_s [hour]
정거장 저압 배전반	1	0.005340	187
	2	0.005389	185
	3	0.005301	188
	4	0.005431	184
	5	0.005468	184
	6	0.005470	184
	7	0.005420	185
	8	0.005355	186
정류기 모선	9	0.001720	259
	10	0.002014	228
	11	0.001720	259

표4. 산출결과표

구분	위치	고장률, f_s [횟수/year]	고장당 지속시간, r_s [hour]
정거장 저압 배전반	1	0.007382	197
	2	0.007092	204
	3	0.007092	204
	4	0.007301	199
	5	0.007098	203
	6	0.007053	204
	7	0.007053	204
	8	0.007100	203
정류기 모선	9	0.003492	256
	10	0.003492	256
	11	0.003453	258

두 방안에 대해 신뢰도 지수별로 비교그래프를 작성하면 아래와 같다

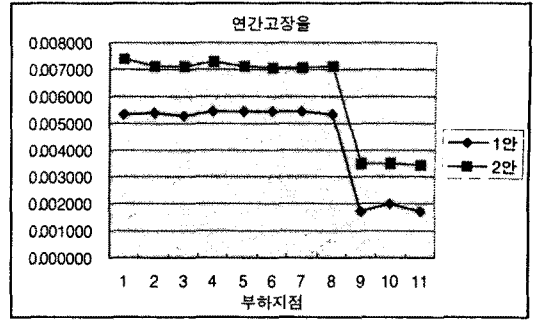


그림5. 양 급전방안의 연간 고장률

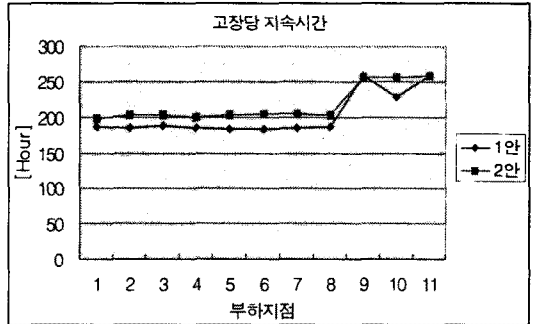


그림6. 양 급전방안의 고장당 지속시간

두 급전방식의 구성 설비기기는 거의 비슷한데 반해 그림5와 그림6에서 보듯이 "1안"이 "2안"에 비해 고장률과 고장당 지속시간 분포가 낮아 보다 신뢰할 수 있는 계통임을 알 수 있다.

3. 결 론

이상은 경전철 급·배전 계통 구성방식에 따른 각 정거장 배전반에서의 신뢰도 평가결과이며, "급전·배전계통 분리방안"(1안)이 "급전·배전계통 일괄구성방안"(2안)에 비하여 연간 고장률과 고장당지속시간이 적으므로 상대적으로 신뢰도가 높다는 결론을 내렸다. 단, 상기 2개 안은 경전철의 특성상 다음과 같은 몇가지 조건을 전제로 하여 구성되었기 때문에 이와 다른 조건에서는 재평가가 이루어져야 한다.

- (1) 급전변전소의 수전용량을 10,000kW이하로 제한하여 22.9kV로 수전하는 것을 원칙으로 한다
- (2) 정거장 배전계통은 전기설 면적을 최소화하기 위해 6.6kV를 채택한다
- (3) 급전과 배전계통은 공히 상시 및 예비수전선로를 확보하고 있어야 한다. -끝-

[참 고 문 헌]

- [1] 김용하외, "인천국제공항 배전계통 신뢰도평가에 관한 연구", 대한 전기학회 논문지, 48A-10-4, pp.1198-1206,1999
- [2] IEEE, "Recommended Practice For Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", 493-1980 p. 81
- [3] IEEE, ibid, pp. 22~23
- [4] IEEE, ibid, pp. 110~111
- [5] IEEE, ibid, pp. 25~26