

설비의 고장을 데이터를 이용한 변전소 신뢰도 분석 연구

이용희 · 백두현 · 장석한
한국전력공사

Reliability analysis for substation based on the failure rate data the facilities

Y.H Lee · D.H Baek · S.H Jang
Korea Electric Power Corporation

Abstract - The most crucial requirement of a power system is to supply quality electric energy to customers without interruption. this problem is directly related to reliability of power system. Reliability assessment of power system has been an important topic for the past several decades. This paper deals with reliability assessment of a 154kV power substation in KEPCO. In this paper, exponential distribution is used to calculate reliability index. The failure rate data that are utilized for reliability index based on the realistic system. Also, FTA(Fault Tree Analysis) is used to compute substation reliability

1. 서 론

전력설비 운영의 궁극적인 목표는 고장없이 안정적으로 전력을 공급하는 것이다 할 수 있다. 일반적으로 전력은 발전소에서 송출되어 송전선을 통해 변전소로 보내지고 변전소에서는 직접 고압수용가로 전력을 보내거나 또는 낮은 전압으로 변환한 후 수용가로 전력을 공급하게 된다. 이처럼 전력공급은 여러 단계의 복잡한 설비를 통해 공급되어지므로 고장없이 완벽한 상태로 설비운영을 한다는 것은 상당히 어렵다. 현장에서 운영되고 있는 설비들은 완벽하지 않게 때문에 어떤 시스템(여기서는 전력계통)에 포함된 개별 기기에 대한 무고장 운영은 현실적으로 한계가 있을 수 밖에 없다. 모든 설비는 요구된 성능보장을 위해 수명이 정해져 있으므로 시간의 경과에 따라 설비가 노후화되며 그 결과로서 설비의 동작 신뢰도도 저하되어 간다고 할 수 있다. 전력계통을 구성하고 있는 설비는 수명특성을 가지고 있으며 이 수명특성에는 어떤 시점에서의 신뢰도도 포함되어 있다. 시스템 구성요소의 개별 신뢰도가 산출되면 시스템전체 신뢰도를 알 수 있는 것과 같이 설비의 개별 신뢰도를 통해 전력계통의 신뢰도를 산출할 수 있다. 그러나 현재 실 계통에서 정량적인 값으로 평가 및 활용되고 있는 계통신뢰도는 없는 실정이다. 계통의 신뢰도를 정량적으로 파악하지 못한 상태에서는 설비운영에 대한 최적의 자원배분을 기대할 수 없다. 따라서 본 연구는 고장통계를 이용하여 설비별 고장율을 도출하고 이것을 기준으로 하여 산출된 송전설비의 신뢰도를 이용하여 변전소의 전력공급 신뢰도를 계산하고자 하였다. 본 연구결과는 전력계통의 확률적 취약개소를 알 수 있고 또 앞으로의 사용기간에 따른 설비별 신뢰도를 예측할 수 있으므로 예방정비의 우선순위 결정과 신뢰도에 따른 적절한 정비주기를 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 전력계통에 대한 신뢰도분석은 고장목분석(FTA)기법을 사용하였다.

2. 신뢰도 분석 방법

신뢰도(Reliability)는 시스템, 기기 및 부품등이 규정된 조건하에서 의도하는 기간동안 목표한 기능을 발휘할 확률(Probability)로 정의 할 수 있다. 신뢰도에는 설계, 제작 및 시험등의 과정을 거치면서 획득된 제조자가 제공하는 고유신뢰도(Inherent Reliability)와 시스템이 실제로 사용되면서 발현되는 사용신뢰도(Operational Reliability)로 구분될 수 있다. 그러나 전력설비는 일반적으로 제조자에 의한 고유신뢰도가 제공되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 사용신뢰도만을 고려하여 전력계통의 신뢰도를 계산하였다.

2.1 고장율λ(t)과 신뢰도함수 R(t)

시간당 어떤 비율로 고장이 발생하고 있는가를 나타내는 고장밀도함수는 단일 부품의 경우는 대부분 정규분포가 되어 사용시간이 증가함에 따라 고장율 λ(t)는 증가한다. 그러나 여러 개의 부품이 조합되어 만들어진 기기나 시스템의 경우는 지수분포가 되는데 이는 고장율이 상이한 여러 개의 부품이 조합되어 있기 때문에 기기 전체의 고장율은 이들의 평균이 되므로 기기의 고장률 λ(t)은 시간에 관계없이 일정하게 된다는 것이다("Drenick의 정리"). 고장율이 시간적으로 일정한 우발고장기간에서는 고장율 λ(t)은 시간에 따라 변하지 않는 상수로 볼 수 있기 때문에 신뢰도 함수R(t)는 다음과 같이 지수분포로 나타나게 된다.

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

- λ : 평균고장률(=MTBF:mean time between failure)
- (1/λ : 평균수명 또는 평균작동시간 (mean life))
- t : 사용(운영)된 시간(h)

본 연구의 계통구성은 송전선로, 개폐기장치, 모선, 변압기로 구성하였다. 보호계전기는 설비고장시에 중속된 event로 볼 수 있으므로 신뢰도 평가대상에서 제외하였다.

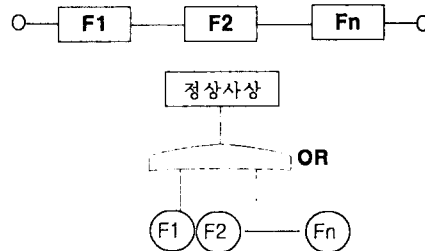
<표 1> 설비별 고장률 산출

구분	설비규모	고장건수	고장율(λ)	비고	
송전선로	가공	28409 C-km	37	1.484×10 ⁻⁷ /h	설비규모 및 고장건수는 '04년도 기준 통계임
	지중	2392 C-km	9	4.295×10 ⁻⁷ /h	
모선	345kV	150 개소	5	3.805×10 ⁻⁶ /h	
	154kV	1042 개소	5	5.477×10 ⁻⁷ /h	
변압기	345kV	167 대	2	1.370×10 ⁻⁶ /h	
	154kV	1623 대	10	0.700×10 ⁻⁶ /h	
개폐기	345kV	1138 대	4	0.400×10 ⁻⁶ /h	
	154kV	5937 대	8	0.154×10 ⁻⁶ /h	
	23kV	6982 대	152	2.408×10 ⁻⁶ /h	

2.2 신뢰성 블록도와 FT(Fault Tree)도

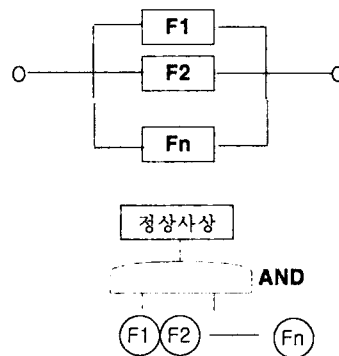
시스템 요소들은 일반적으로 직렬과 병렬로 구성되어 있는데 고장확률에 사용되는 논리회로(FT도)는 블록도와는 반대의 개념으로 적용된다. 즉, 신뢰성 블록도 구성이 직렬인 경우는 OR게이트로, 병렬인 경우는 AND게이트로 결합된 고장목(FT)을 사용하여 고장확률을 계산한다

2.2.1 직렬 블록도 및 FT도



불(不)신뢰도: $F_T = 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \cdot \dots \cdot (1 - F_n)$
 신뢰도 : $R_T = 1 - F_T = 1 - 1 - (1 - F_1) \cdot (1 - F_2) \cdot \dots \cdot (1 - F_n)$
 $= R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n$

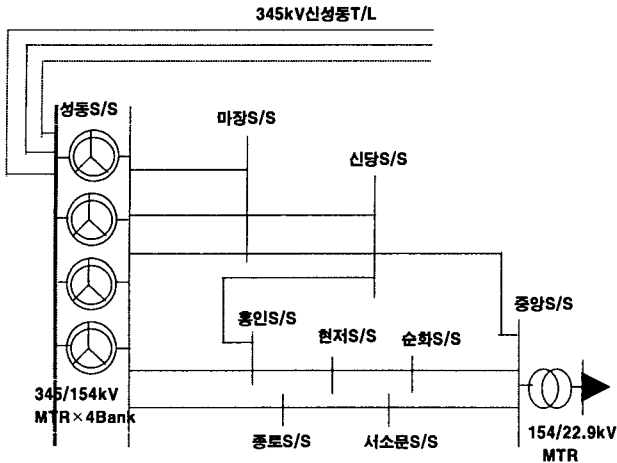
2.2.2 병렬 블록도 및 FT도



불(不)신뢰도: $F_T = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_n$
 신뢰도 : $R_T = 1 - F_T = 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)$

3. 실 계통적용 사례

본 연구에서는 아래 계통도와 같이 345kV 성동변전소와 성동변전소에 연결된 154kV 전 변전소를 하나의 시스템으로 하여 신뢰도를 구하였고, 고장 분석(FTA)에서의 정상사상(최중) 신뢰도는 154kV 중앙변전소 22.9kV 배전선로(D/L) 인출점의 값으로 하였다. 신뢰도 계산시 발전전원(source)은 고장정전이 없는 것으로 가정하였다.



<그림1> 계통도

3.1 설비별 신뢰도 산출

상기 계통에서 설비의 개별 신뢰도와 345kV 전원단, 345kV Mtr, 154kV T/L, 154kV 모선, 154kV Mtr(=22.9kV모선), D/L 등 24개로 그룹핑한 서비스 시스템의 신뢰도를 계산하였다.

<표 2> 설비별 신뢰도 산출표 [2005년 기준 신뢰도]

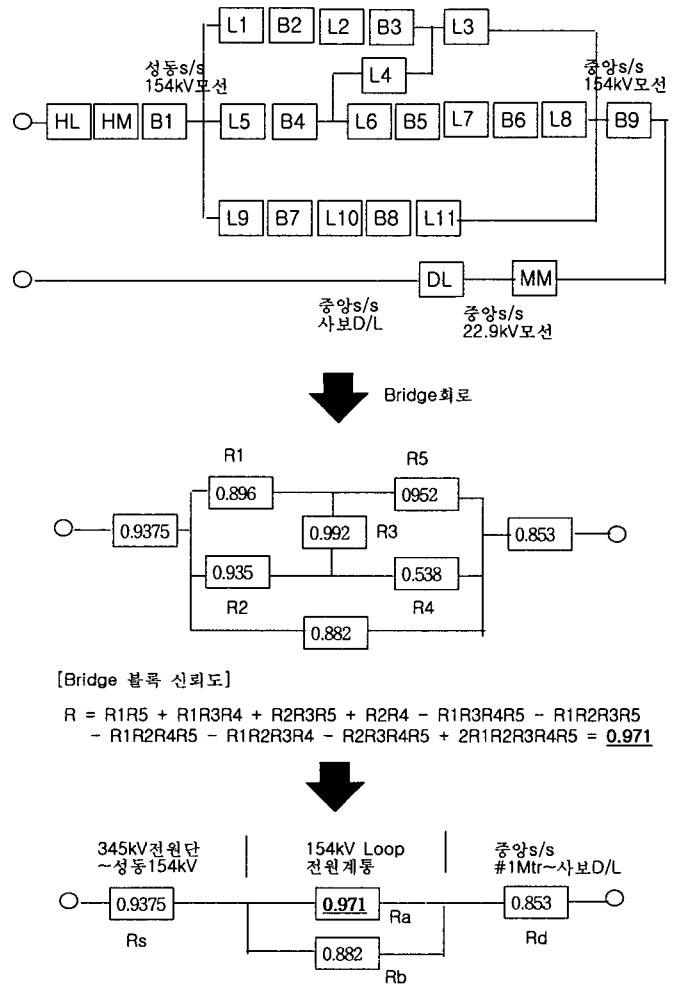
서비스 시스템	설비명칭	설비 신뢰도	불신뢰도	설치 년도	서비스시스템 신뢰도
HL	345kV신성동#1,2,3 T/L	0.97	0.03	1997	0.999991
	#1,2,3Mtr 1차모선Tie CB	0.972	0.028	1997	
	#4Mtr 1차모선Tie CB	0.989	0.011	2002	
HM	345kV #1Mtr	0.909	0.091	1997	0.9746
	345kV #2Mtr	0.909	0.091	1997	
	345kV #3Mtr	0.909	0.091	1997	
	345kV #4Mtr	1.000	0.000	2005	
	345kV #1Mtr 2차 CB	0.989	0.011	1997	
	345kV #2Mtr 2차 CB	0.989	0.011	1997	
	345kV #3Mtr 2차 CB	0.989	0.011	1997	
	345kV #4Mtr 2차 CB	1.000	0.000	2005	
L1	성동마장#1,2,3 T/L	0.959	0.041	1994	0.99992
	성동마장#1,2,3CB(성동측)	0.989	0.011	1997	
	성동마장#1,2,3CB(마장측)	0.989	0.011	1997	
L2	마장신당#1,2 T/L	0.957	0.043	1994	0.99725
	마장신당#1,2CB(마장측)	0.985	0.015	1994	
	마장신당#1,2CB(신당측)	0.985	0.015	1994	
L3	신당중앙 T/L	0.963	0.037	2004	0.952
	신당중앙 CB(신당측)	0.968	0.032	1995	
	신당중앙 CB(중앙측)	1.000	0.000	2005	
L4	신당홍인 T/L	0.996	0.004	2004	0.992
	신당홍인 CB(신당측)	0.998	0.002	2004	
	신당홍인 CB(홍인측)	0.998	0.002	2004	
L5	성동홍인 T/L	0.974	0.026	1998	0.954
	성동홍인 CB(성동측)	0.99	0.01	1998	
	성동홍인 CB(홍인측)	0.99	0.01	1998	
L6	홍인현저 T/L	0.97	0.03	1997	0.95
	홍인현저 CB(홍인측)	0.99	0.01	1998	
	홍인현저 CB(현저측)	0.99	0.01	1998	
L7	현저순화 T/L	0.9	0.1	1977	0.921
	현저순화 CB(현저측)	0.963	0.037	1997	
	현저순화 CB(순화측)	0.963	0.037	1997	
L8	순화중앙 T/L	0.9	0.1	1977	0.876
	순화중앙 CB(순화측)	0.989	0.011	1997	
	순화중앙 CB(중앙측)	0.984	0.016	1993	

L9	성동종로 T/L	1.000	0.000	2005	0.996
	성동종로 CB(성동측)	0.998	0.002	2004	
	성동종로 CB(종로측)	0.998	0.002	2004	
L10	종로서소문 T/L	1.000	0.000	2005	0.985
	종로서소문 CB(종로측)	1.000	0.000	2005	
	종로서소문 CB(서소문측)	0.985	0.015	1994	
L11	서소문중앙 T/L	0.963	0.037	1995	0.949
	서소문중앙 CB(서소문측)	0.986	0.014	1995	
	서소문중앙 CB(중앙측)	1.000	0.000	2004	
MM	중앙S/S #1Mtr	0.969	0.031	2000	0.946
	중앙S/S #1Mtr 1차 CB	0.984	0.016	1993	
	중앙S/S #1Mtr 2차 CB	0.991	0.009	1999	
DL	중앙S/S 사보D/L CB	0.937	0.063	2002	0.937
B1	성동S/S 154kV 모선 *	0.962	0.038	1997	0.962
B2	마장S/S 154kV 모선	0.948	0.052	1994	0.948
B3	신당S/S 154kV 모선	0.948	0.052	1994	0.948
B4	홍인S/S 154kV 모선	0.98	0.02	1998	0.98
B5	현저S/S 154kV 모선	0.78	0.22	1978	0.78
B6	순화S/S 154kV 모선	0.9	0.1	1994	0.9
B7	종로S/S 154kV 모선	1.000	0.000	2004	1.0
B8	서소문S/S 154kV 모선	0.948	0.052	1994	0.948
B9	중앙S/S 154kV 모선	0.962	0.038	1993	0.962

* 345kV 모선방식은 15CB 차단방식이므로 양 모선에 동시 고장이 발생 하더라도 정전이 발생되지 않으므로 345kV 모선 신뢰도는 생략하였음

3.2 신뢰성 블록도 구성

<그림1>의 계통도를 24개의 서비스시스템으로 신뢰성 블록도를 재구성 하면 아래 <그림2>와 같다.



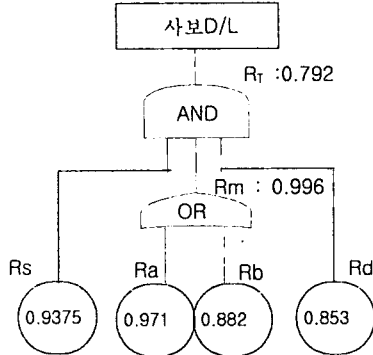
[Bridge 블록 신뢰도]

$$R = R1R5 + R1R3R4 + R2R3R5 + R2R4 - R1R3R4R5 - R1R2R3R5 - R1R2R4R5 - R1R2R3R4 - R2R3R4R5 + 2R1R2R3R4R5 = 0.971$$

<그림2> <그림1 계통도>의 신뢰성 블록도

3.3 변전소 공급신뢰도 산출

상기 계통에서 배전선로(D/L) 인출점을 정상사상(시스템 신뢰도)으로 본다면 <그림2>를 아래 그림과 같이 논리회로로 구성하고 FT(Fault Tree) 분석을 실시함으로써 시스템 전체에 대한 신뢰도가 구해진다. 아래표의 R_T 값은 345kV전원단에서부터 중앙S/S 사보D/L까지의 계통신뢰도이므로 또한 중앙S/S의 D/L Feeder공급 신뢰도의 의미로도 사용될 수 있다.



구분	논리 회로	산출식	신뢰도	비 고
154kV Loop 전원계통 (서브시스템)	OR	$R_m = 1 - (1 - R_a)(1 - R_b)$ $= 1 - (1 - 0.971)(1 - 0.882)$	0.996	
사보D/L (전체시스템)	AND	$R_T = R_s \cdot R_m \cdot R_d$ $= 0.9375 \cdot 0.99 \cdot 0.853$	0.792	

〈그림 3〉 중앙S/S의 공급신뢰도 FT분석

4. 결 론

지금까지 살펴본 신뢰도 분석 결과를 계통구간별로 아래와 같이 요약하였다.

계통 구간		신뢰도	비고
from	to		
전원단	~ 성동S/S 345kV 모선점	0.999991	
전원단	~ 성동S/S 345kV Mtr	0.9746	
전원단	~ 성동S/S 154kV 모선점	0.9375	
전원단	~ 중앙S/S 154kV 모선점	0.9281	
전원단	~ 중앙S/S 22.9kV 모선점	0.8779	
전원단	~ 중앙S/S 사보D/L 인출점	0.792	
전원단	~ 신당S/S 154kV 모선점	0.888	* FT재구성
전원단	~ 서소문S/S 154kV 모선점	0.810	* FT재구성

계통이 전원단으로부터 접속단계가 많아질수록 공급신뢰도도 점점 떨어지고 있음을 확인할 수 있다. 345kV 모선측 신뢰도는 345kV 변전소 15CB 차단방식에 따라 모선고장일때도 정상공급이 가능하므로써 모선측 신뢰도가 0.999991로 높게 나타났는데 이것은 345kV 전원이 정전될 확률은 거의 없다는 의미로 해석될 수 있다. 따라서 변전소의 신뢰도 검토는 345kV 변전소 Mtr Bank 이후부터 신뢰도를 고려하여도 큰 오차가 없을 것으로 판단된다. 345kV 전원단에 포함되어 있는 동일 계통의 변전소라도 계통구성, 송전선의 공장, 설비의 사용년도 등에 따라 각기 신뢰도가 다르다는 것을 확인할 수 있다. 신뢰도는 고장통계에 의해 산출된 값이므로 확률적 의미로 활용되어야 한다. 위의 중앙S/S 사보D/L의 신뢰도 0.792는 정상적으로 전력을 공급할 수 있는 확률이 79.2%라는 의미이며 반대로 정전이 발생할 확률도 20.8%라는 의미를 담고 있다. 본 연구의 몇 가지 특징을 제시하면, 첫째 전력계통의 신뢰도를 수치적으로 표현할 수 있기 때문에 계통설비의 취약개소를 모니터링 할 수 있다. 둘째 계통구성에 따라 공급신뢰도가 상이한 정도를 정량적으로 표현할 수 있으므로 추후 계통구성 검토에 활용될 수 있다. 셋째 신뢰도함수는 고장율이 정해지면 기간에 대응된 값으로 산출되므로 임의시점에 대한 신뢰도를 예측할 수 있어 경제적 투자를 고려한 중장기 설비계획 수립에 활용될 수 있을 것이다. 즉 고장율 및 신뢰도를 적용함으로써 설비의 투자계획시 우선순위의 결정기준으로 활용될 수 있겠다. 넷째 신뢰도를 ERP 시스템에 연계하여 온라인 전산관리시 각 변전소별 신뢰도 확인이 실시간 가능하므로 전사적인 신뢰도관리가 용이할 것으로 예상된다. 참고로 본 연구에서 사용된 고장율은 서두에서 언급한 것과 같이 설비 제작업체가 제시한 데이터가 아닌 고장통계에 의한 자료이므로 동종의 설비는 모두 동일한 고장율을 가지는 것으로 가정하였다. 정확한 신뢰도 평가를 위해서는 고장통계의 누적관리와 주기적인 자료의 업 데이터가 필수적이라 하겠다. 신뢰성관리에 있어서 중요한 것은 설비별 고장율을 어떻

게 얻는가 하는 것인 만큼 정확한 데이터에 기초한 신뢰도 분석은 보다 효율적이며 경제적인 설비운영에 도움을 줄 것으로 기대된다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 이상용, "신뢰성공학", 형설출판사, 1996, p25~38
- [2] 장중순외 5, "신뢰성기법관리", 한전 중앙교육원, 1998, p135~138
- [3] 이용희, "변전설비의 고장률data를 이용한 feeder 공급신뢰도분석", 대한설비관리학회지 제5권 제1호, 대한설비관리학회, 2000
- [4] "2004 송전설비 고장분석 및 대책", 한전 송변전처 송전운영팀, 2005
- [5] "2004 변전설비 고장분석 및 대책", 한전 송변전처 변전운영팀, 2005
- [6] "송전계통의 확률론적 공급신뢰도 평가체계 구축에 관한 연구", 산업자원부, '04.4
- [7] "일일 정전고장 현황자료", 한전 배전처, '04.1.1~'04.12.31
- [8] Gwang Won Kim and Kwang Y. Lee, "Substation Reliability Assessment -ent Consider Non-Exponential Distributions And Restorative Action -s", KIEE INTERNATIONAL TRANSACTIONS ON Power Engineering, KIEE, Vol. 3-A, No. 3, Sep. 2003