

신뢰도지수 종합화에 의한 배전계통 신뢰성 평가

이 범* · 김용하** · 최상규*** · 이형노** · 김형중**
 여수대 전기공학과, 인천대 전기공학과, 안양과학대 전기제어과

Reliability Assessment by Reliability Indices Unification

Buhm Lee*, Yong-ha Kim**, Sang-kyu Choi***, Hyung-ro Lee**, Hyung-jung Kim**
 Yosun National University*, Inchon University**, Anyang Technical College***

Abstract - This paper describes the unified reliability evaluation with partial loss of continuity for complex distribution system. To evaluate reliability considering line limitation of the system, PLOC technique is employed. And reliability indices calculation method is used. Finally, Analytic network process method is employed. As a result, calculating accurate reliability, finding weak points, and expansion scheduling of the system is possible.

1. 서 론

배전계통의 신뢰도 해석기법(1)을 사용하는 PSS/U와 같은 상용소프트웨어에는 방사상계통만을 다룰 수 있기 때문에, 병렬회로 및 루프를 포함하고 있는 배전계통의 경우에는 단순히 전압강하, 선로의 조류 등을 계산한 다음, 보강이 요구되는 설비를 결정하는 방법(2)을 사용하여 왔다.

이러한 배전계통에 대하여 신뢰도 및 다양한 신뢰도지수를 산정(3)한 다음, 이들 신뢰도지수들을 계층화 의사결정법(이하 AHP)(4)을 이용하여 하나의 종합적인 지수를 산출할 수 있도록 하는 연구(5)를 저자들이 진행한 바 있다. 그러나, 이들 방법 역시 완전정전상태(이하 TLOC)만을 고려하여 신뢰도를 계산함으로써 일부 선로의 고장 등의 이유로 제한적인 전력공급만이 가능한 경우를 고려할 수 없는 단점이 있었다.

그러므로 본 연구에서는 배전계통에 대한 신뢰도를 TLOC 뿐만 아니라 일부 전력공급설비의 고장 등으로 충분한 전력을 공급할 수 없는 상태(Partial Loss of Continuity: 이하 PLOC)까지도 고려하여 정확한 신뢰도를 계산할 수 있도록 하였으며, Analytic network process (이하 ANP)(6)기법을 도입하여, 앞서 구한 신뢰도지수를 하나의 척도로서 종합할 수 있도록 하였다. AHP에 의한 방법은 계층을 구성하고 있는 요소들의 관계가 단순히 수직적인 구조만을 갖게되는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 부하집단 요소들을 클러스터라는 단위로 집단화하고, 이들 클러스터를 가중 처리하여 수평적인 평가를 할 수 있는 ANP라는 기법을 전력계통의 배전신뢰도산정에 처음 적용하였다. 이 결과, AHP에서 고려할 수 없었던 부하집단의 크기 등을 반영할 수 있게 되었다.

제안한 방법을 인천국제공항의 배전계통에 적용하여 본 연구의 유용성을 검증하였다.

2. 신뢰도 및 신뢰도지수의 계산

배전계통에 대한 신뢰도계산은 TLOC만을 대상(3)(5)으로 하여 왔으며, 이의 계산방법으로는 계통축약법과 고장모드-효과분석법(1)(3)을 주로 사용하고 있다. 그러나 일부 선로의 고장 등으로 과도한 전압강하나 선로과부하가 발생하는 경우에는 일부설비에만 전력이 공급되어 전체설비의 정상적인 운전이 불가능하게 된다. 그러므로 이와 같은 상태를 의미하는 PLOC(1)를 TLOC와 함께 고려하여 설비신뢰도를 계산하여

야 실제적으로 계통에서 발생할 수 있는 모든 상황을 고려할 수 있게 된다. PLOC를 고려한 배전계통에 대한 신뢰도계산은 다음과 같이 하였다.

① TLOC에 대한 신뢰도의 계산

고장모드-효과분석법으로 고장조합을 설비별로 결정한 후, 모든 전력설비에 대하여 TLOC만 으로 신뢰도를 계산한다.

② PLOC대상 결정

①에서 결정된 모든 경우의 고장조합에 대하여 각 고장조합별 조류계산을 통하여 전압기준치 및 선로용량기준치를 초과하는 조합을 추출하고, 이 조합들을 PLOC대상으로 결정한다.

③ 고장조합별 기본신뢰도 값의 산정

②에서 결정된 PLOC 대상에 대한 i 조합의 고장을 λ_i , 고장지속시간 r_i , 연간고장지속시간 U_i , 공급지장전력 L_i , 및 전력량 E_i 를 다음으로 계산한다. 이때, r_i 의 결정에는 재페로 여부가 영향을 미치게되는데, 본 연구에서는 수리완료시까지 재페로가 되지 않는다고 가정하고 계산하였다.

$$\lambda_i = \lambda_{ei} P_i + \lambda_{ei} (1 - P_i) \lambda_{Li} \frac{r_{ei} r_{Li}}{r_{ei} + r_{Li}} \quad (1)$$

$$r_i = r_{ei} \quad (2)$$

$$U_i = \lambda_i r_i \quad (3)$$

$$L_i = \left[\int_0^{t_1} L_{i(t)} dt - L_{si} t_1 \right] / t_1 \text{ [MW]} \quad (4)$$

$$E_i = L_i U_i \text{ [MWh/y]} \quad (5)$$

여기서,

$$\lambda_{Li} = \frac{P_i}{1 - P_i} \lambda_{Hi} \cdot r_{Li} = \frac{1}{\lambda_{Li}}$$

$L_{i(t)}$: 시간대별 부하의크기(큰 순서로 정리 후)(MW)

t_1 : 대상중 $L_{i(t)}$ 가 L_{si} 보다 큰 시간대의 비율

④ PLOC대상 신뢰도 계산

③에서 구한 고장조합별로 기본신뢰도로부터 개개의 전력설비에 대한 PLOC대상 신뢰도를 다음으로 구한다.

$$\lambda_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i, U_p = \sum_{i=1}^n U_i, r_p = U_p / \lambda_p \quad (6)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^n E_i, L_p = E_p / U_p$$

여기서,

$\lambda_p, U_p, r_p, E_p, L_p$: PLOC대상 신뢰도

n : 해당 전력설비가 갖고있는 고장조합의 수

⑤ 종합신뢰도의 계산

PLOC를 감안한 종합신뢰도는 TLOC대상 신뢰도 λ_t, r_t 에 식(6)을 더하여 계산한다.

$$\lambda = \lambda_t + \lambda_p, r = r_t + r_p, U = \lambda r \quad (7)$$

⑥ 신뢰도지수 계산

계통의 신뢰도를 복합적으로 평가할 수 있는 지수(3)를 계산한다. 이들 지수로는 수용가중심의 지수인 SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI와 에너지중심의 지수인 ENS, AENS를 사용하였다.

3. 신뢰도지수의 종합화 및 평가

앞서 계산한 신뢰도지수는 다양한 성질을 나타내기 때문에, 계통의 운용 및 계획수립자가 합리적인 의사결정을 하기 위하여 이들 신뢰도지수를 단일한 종합적인 지수값으로 계산할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 지수의 통합을 위한 기법으로 최근에 개발된 ANP기법을 도입하였다. ANP는 유사한 특성을 갖는 요소들을 평가대상, 평가기준1, ..., 평가기준 n의 클러스터로 그룹화한다음, 이들 요소간의 관계, 클러스터간의 관계로서 종합 평가하는 방법으로, 이를 사용하여 배전계통의 종합적인 중요도를 구하는 과정은 다음과 같다.

① 평가대상, 평가기준 요소 및 클러스터의 구성

종합적인 평가를 하고자 하는 것은 부하집단별 신뢰도이므로, 부하집단 1..n의 신뢰도지수를 요소로 하고, 이들 요소로 평가대상 클러스터인 부하 클러스터를 구성하였다. 또한 평가기준으로는 수용가 클러스터와 에너지 클러스터를 구성하였으며, 이들 클러스터의 요소로는 SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI와 ENS, AENS로 각각 구성하였다.

② 자체 및 상호관계행렬의 구성

우선, 평가대상으로 각 부하집단별 크기를 사용하여 부하 부하 행렬을 구성하였다. 평가기준으로 여러 전력회사에서 사용하는 각 신뢰도지수의 사용빈도를 이용하였는데, SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI의 사용빈도로부터 수용가-수용가 행렬을, ENS, AENS의 사용빈도로부터 에너지-에너지 행렬을 구성하였다. 또한, 각 부하집단별 신뢰도지수의 크기의 상관관계로부터 부하-수용가, 부하-에너지, 수용가-부하, 수용가-에너지, 에너지-부하, 에너지-수용가행렬을 구성하였다.

③ 초행렬의 구성

②에서 구성된 각 행렬을 정리한 통합행렬이 초행렬로, 이는 요소간, 클러스터간의 관계를 종합적으로 나타낸 것이다.

표 1 신뢰도모델의 초행렬

		부 하						수용가 지수				에너지 지수	
		부하1	부하2	부하3	부하4	부하5	부하6	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
부하	부하1												
	부하2												
	부하3												
	부하4												
	부하5												
	부하6												
수용가 지수	SAIFI												
	SAIDI												
	CAIDI												
	ASAI												
에너지 지수	ENS												
	AENS												

④ 가중행렬의 구성 및 가중 초행렬의 구성

표 1의 초행렬에 클러스터별로 가중치를 설정할 수 있는데, 이를 사용하여 특정 평가기준, 평가대상을 강조할 수 있도록 한 것이 가중행렬이다. 가중행렬의 클러스터별 값을 초행렬의 각 클러스터 요소에 곱해 가중 초행렬을 계산한다.

⑤ 중요도의 결정

④로부터 구해진 가중초행렬을 수렴화과정(6)을 통해 수렴화, 클러스터별 정규화를 통해 중요도를 계산한다. 이로부터 부하의 중요도가 구하며, 이 중요도가 종합적인 평가지수이다.

4. 사례연구

4.1 대상계통 및 특성자료

본 연구에서는 대규모 배전계통인 인천국제공항을 대상으로 하였으며, 계통자료로는 실제통지료를 사용하였고, 이중 PLOC대상인 부하점에 대한 특성자료만을 표2에 나타내었다.

표 2 부하점의 특성자료 (PLOC 대상)

송전점	부하	선로	선중 (mm)	용량 (Kw)	길이 (Km)	R	X	부하 (KW)	
								최소	최대
BI	IBC 4	BI 부하	200	10000	2.1	0.090101	0.044450	5540	11080
			600	20000	5.6	0.080090	0.118533		
A3	IBC 4	A3 남측 부하	200	10000	2.1	0.090101	0.044450	12000	24000
			600	20000	2.6	0.037185	0.055033		
A4	화물청사 1234	A4 화물	600	20000	1.6	0.022883	0.033867	12000	24000
			600	20000	2.8	0.040015	0.039267		
BI	1234	화물 청사	600	20000	1.6	0.022883	0.033867	12000	24000
			600	20000	1.6	0.022883	0.033867		

각 기기별 신뢰도자료인 λ_i, r_i 는 기존의 옥외설비를 기준으로 IEEE에서 조사한 실적자료(8)를 사용하였다. 각 전력회사들이 사용하는 신뢰도지수의 사용정도는 표 3과 같다.(1)

표 3 전력회사별 신뢰도지수의 사용정도

	SAIFI	SAIDI	CAIDI	ASAI	ENS	AENS
전력회사	20	22	16	23	11	11

인천국제공항의 부하는 부하의 중요성과 전력공급방식에 따라 다음과 같은 6개의 부하집단으로 구분하여 구성하였다. 여기서, 대규모부하는 터미널 등과 같이 개개의 규모가 큰 부하를 선정하였으며, 소규모부하는 가로등과 같이 개개의 규모가 작은 부하로 선정하였다. 따라서, 소규모부하라 하더라도 부하의 개수가 많기 때문에, 반드시 부하의 크기가 작은 것은 아니다. 또한, 부하집단 1,4는 전력공급점이 1개인 부하를, 부하집단 2,5는 전력공급점이 2개인 부하를, 부하집단 3,6은 전력공급점이 3개 이상인 부하로 구성하였다.

표 4 각 부하집단의 구분 및 부하의 크기

전원의수	대 규모			소 규모		
	1	2	3	1	2	3
구분	부하집단 1	부하집단 2	부하집단 3	부하집단 4	부하집단 5	부하집단 6
부하의크기	51,500	17,964	37,680	2,047	39,312	23,639

4.2 신뢰도 및 신뢰도지수 계산결과

고장발생이 가능한 모든 경우에 대하여 조류계산을 시행하고 각 부하에 공급되는 전압과 선로의 조류를 검토해 본 결과, 부하집단 2에 속한 IBC 4 와 부하집단 5에 속한 화물청사만이 PLOC 대상으로 나타났다. 따라서, 이 부분에 대하여 PLOC를 식(1)~식(5)로 계산한 결과를 표 5에 나타내었다.

표 5 PLOC 계산결과

고장 유형	Ls (Kw)	P (W)	rH (W)	λe	r= re	λH	λL	rL	λ	U	L (Mw)	E (Mwh/y)	
													IBC 4
IBC 4	①	10,000	0.195	468	0.3151	90.00	0.214	0.0518	19.32	0.2709	24,335	540	13141
	②	10,000	0.195	468	0.1918	128.28	0.214	0.0518	19.32	0.1712	22,028	540	11885
합계											46,363	540	25026
화물청사	①	20,000	0.333	7992	0.3696	84.85	0.1252	0.0636	15.96	0.3337	28,002	2000	5004
	②	20,000	0.333	7992	0.3173	92.59	0.1252	0.0636	15.96	0.2637	26,478	2000	5265
합계											54,474	2000	10269

표 2.5 로부터 IBC 4 와 화물청사는 두 개의 선로가 모두 가동중일 때는 정상적인 운전이 가능하지만, 어느 한 선로가 차단되었을 때에는 최대부하가 11.08(Mw)와 24.0(Mw)로 선로 용량인 10(Mw)와 20(Mw)를 초과하여 정상적인 운전이 불가능하며, 따라서 표 5의 P와 같이 하루중 IBC 4는 19.5%, 화물청사는 33.3%동안은 부하를 만족시킬 수 없다.

이와 같이 구한 PLOC는 표 5의 음영부분과 같다. 이와 같이 PLOC를 감안하여 신뢰도를 계산한 결과, IBC4의 λ 는 0.0027에서 0.4448로, 화물청사의 λ 는 0.0035에서 0.6199로 증가하고 있다. 이는 PLOC를 감안하여 계산하여야만, 실제 상황이 정확하게 반영된 신뢰도를 계산할 수 있게 된다. TLOC만의 경우와 PLOC를 고려한 경우중 IBC4와 화물청사가 관련된 집단의 신뢰도지수를 표 6에 나타내었다.

표 6 신뢰도지수 산정결과

신뢰도 지수 부하집단	수용가중집중지수				에너지중집중지수		비고
	SAFI [수] 수중기	SMDI [수] 수중기	CMDI [수] 수중기	ASMI	ENS [MWh]	AES [MWh]	
부하집단 2	0.0022536	0.332296	162.4450	0.9999682	65	217	TLOC 만
	0.1525717	15.835100	105.3048	0.9981923	520.5	1734.9	PLOC 감안
부하집단 5	0.0034875	0.3721	113.8942	0.9989547	15.0	30.4	TLOC 만
	0.2531423	22.47787	98.783212	0.9972354	132.2	278.6	PLOC 감안
계통 전체 신뢰도	0.0682317	8.036877	117.7894	0.9990825	1515.5	217.2	TLOC 만
	0.0922579	10.363928	111.2532	0.9968283	3337.7	478.2	PLOC 감안

PLOC대상 부하가 없는 부하집단 1,3,4,6는 TLOC만으로도, PLOC 대상 부하인 IBC 4와 화물청사를 갖고 있는 부하집단 2,5는 PLOC를 감안한 신뢰도를 계산하였을 때에만 실제상황을 반영한 지수를 계산할 수 있었다. 부하집단 2,5는 PLOC를 감안함으로써 신뢰도가 나빠지고 있는데, 이는 지수가 나빠진다고 보다는 실제상황을 반영함에 기인하는 것이라 할 수 있다. 이중, 부하집단 5는 부하집단 4와 큰 차이가 없을 정도로 신뢰도지수가 나빠지고 있는데, 이는 화물청사의 최대부하가 24[Mw](부하집단 5의 최대부하: 39.312[Mw])로 매우 커서 지수에 크게 영향을 미치기 때문이다.

4.3 신뢰도지수 종합화 및 평가

본 연구에서는 ANP를 사용하여 종합적인 신뢰도를 평가하고, 이를 AHP를 사용한 방법[5]과 비교하였다. 본 연구에서는 부하에 대한 영향을 알아보기 위하여 가중행렬 요소중 부하-부하클러스터만을 변화시키고, 기타의 클러스터는 모두 1로 하였다. 부하-부하 클러스터의 가중계수에 따른 중요도를 그림 1에 나타내었다.

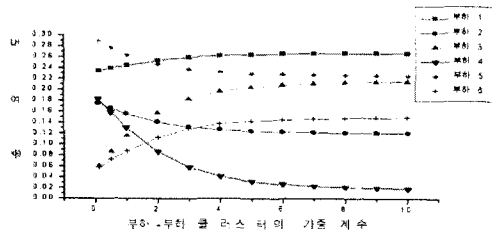


그림 1 가중행렬의 변화에 따른 부하집단의 중요도

그림 1로부터 ANP에 의한 결과를 AHP에 의한 결과와 비교하기 위하여 부하-부하 클러스터의 가중치가 5인 경우에 대해 계산한 중요도를 산정해 본 결과를 그림 2에 나타내었다.

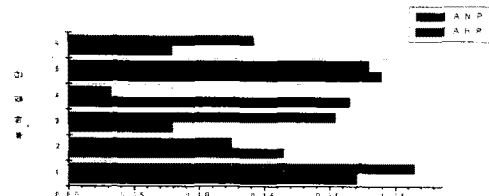


그림 2 AHP 및 ANP에 의한 부하집단별 중요도의 계산결과

우선, AHP에 의한 중요도를 살펴보면, 대규모 부하집단에서는 전력공급점이 하나인 부하집단 1이 중요도가 가장 크게

나타나는데, 이는 전력공급점이 하나인 부하를 개선하였을 때 신뢰도의 향상이 두드러짐을 의미한다. 반면, 소규모부하집단에서는 대규모부하와 달리 전력공급점이 2개인 부하집단 5에서 가장 크게 나타나고 있다. 이는, 부하집단 2에는 PLOC에 해당되는 IBC 4가 있음에도 IBC 4의 부하가 순서를 바꿀 정도로 크지는 않은 반면, 부하집단 5의 부하에 있는 화물청사는 부하가 상당히 커서 순서에 영향을 미치기 때문이다.

반면, ANP에 의한 중요도를 살펴보면 AHP에 의한 결과와 다른데, 이는 ANP가 부하의 상대적 크기를 감안하기 때문이다. 즉, 전원의 수가 작을수록, 또한 부하가 클수록 계산된 중요도는 크게 나타나게 된다. 우선, 부하집단 1,2,3에서 중요도는 1)2)3 \Rightarrow 1)3)2 로 변화한다. 여기서 부하집단 2와 부하집단 3의 순위가 바뀌고 있는데, 이는 부하집단 2의 크기가 부하집단 3의 크기에 비해 상당히 작기 때문이다. 또한, 소규모 부하인 부하집단 4,5,6에서 5)4)6 \Rightarrow 5)6)4로 변화하는데, 이는 부하집단 4의 크기가 매우 작아 부하집단 4를 개선해도 신뢰도의 증가가 미미하기 때문이다. 즉, 부하가 클수록 전력공급점을 늘렸을때의 효과가 큼을 알 수 있다.

그림 1에서 부하-부하의 가중치를 작은 값인 0.1로 주었을 경우에는 AHP로 계산하였을 때와 마찬가지로 5>1>4>2>3>6의 중요도를 나타내고 있으나, 가중치를 크게함에 따라 부하가 상대적으로 큰 부하집단 1,3,6은 점차 중요도가 높아지고 있는 반면, 부하가 상대적으로 작은 부하집단 2,4는 점차 중요도가 낮아지고 있어 가중치를 크게 함에 따라 부하의 크기를 반영할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 신뢰도를 평가함에 있어, 부하집단별 부하의 크기까지도 고려하여야만 정확한 평가와 보강계획의 수립 등이 가능함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 TLOC만을 대상으로 신뢰도를 계산하는 방법에서 진일보하여 PLOC까지도 감안하여 신뢰도를 계산할 수 있도록 하였으며, TLOC에 기반을 둔 신뢰도와 PLOC를 감안한 신뢰도 모두에 대하여 배전신뢰도지수를 계산하고 비교한 결과, PLOC를 고려하여야만 정확하게 계산할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, ANP를 사용하여 종합적인 중요도를 산정함으로써 AHP에서 사용하던 신뢰도지수 및 전력회사들의 신뢰도지수 사용실적뿐만 아니라, 부하집단의 크기까지도 감안한 중요도를 계산할 수 있었다. 이 결과, 부하의 크기가 큰 부하를 보강할 경우에 보다 효과적임을 알 수 있었으며, 각 클러스터의 수평적 관계까지도 고려할 수 있는 ANP를 사용하여 보다 타당한 종합적 평가를 할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 여수대학교 설비 자동화 및 정보시스템 연구개발센터의 지원에 의한 것입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Roy Billinton, Ronald N. Allen, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
- [2] LG산전 컨소시엄, "인천국제공항 수·변전시설사업 기술제안서", 1998
- [3] 이범, 김용하, 최상규, "산업체통의 신뢰도산정에 관한 연구", 에너지공학, 제 8권 제 호, 1999. 9.
- [4] Marija D. Ilic, Shell Liu, "Hierarchical Power Systems Control - Its Value in a Changing Industry", Springer, 1996.
- [5] 김용하, 이범, 최상규, 정영석, 문정호, "인천국제공항 배전체통의 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 48권 제 10호, 1999. 10.
- [6] Thomas L. Satty, "The Analytic Network Process : Decision Making with Dependence and Feedback", RWS Publications, 1996.
- [7] 신공형건설공단, "인천국제공항 수배전 기본설계 재정리 보고서", 1997.
- [8] IEEE, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, ANSI, 1991.