

설비고장의 불확실성을 고려한 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선에 관한 연구

전동훈* 전영수* 최영도* 김건중**
한전 전력연구원* 충남대학교**

A Study on the Reliability Characteristic Curve of Transmission System considering Outage's Uncertainty

D.H.Jeon* Y.S.Jeon* Y.D.Choi* K.J.Kim**
KEPRI* ChungNam National Univ.**

Abstract - 설비고장의 불확실성을 고려하여 송전계통의 공급신뢰도 특성을 명확하게 나타낼 수 있는 곡선을 제안하였다. 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장의 수나 각각의 경우에 대한 공급지장전력, 고장지속시간 등 설비고장의 불확실성에 상관없이 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지의 관계를 $y = ax^{-1}$ 형태의 곡선으로 나타낸 것이다. 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 계통규모(년도별, 국가별)에 상관없이 동일한 모양을 가지게 되는데, Energy Impact of Reliability(EIR) 등을 확률론적 공급신뢰도 기준으로 사용함으로써 동등한 조건에서 계통규모 및 신뢰도 수준을 절대적으로 비교할 수 있는 신뢰도 지표로 활용할 수 있다.

(그림 1)에서 공급지장확률(PLC)은 공급지장을 일으키는 상정사고별 고장확률의 합이고, 공급지장시간(EDLC)은 공급지장확률(PLC)에 8760시간을 곱한 값으로 공급지장의 발생확률(Probability)을 의미한다. 다음 공급지장 전력(EUD)는 상정사고에 의해 유발되는 공급지장 전력의 합으로 공급지장이 계통에 미치는 충격도(Impact)를 의미한다. 마지막으로 공급지장에너지(EENS)는 공급지장확률(PLC)과 공급지장전력(EDNS)을 곱한 값인데, 발생확률과 충격도를 동시에 고려한 지수라고 말할 수 있다.

1. 서 론

전력계통의 신뢰도(reliability)란 전력계통이 운전 제약조건을 만족하면서 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는데, 전력계통이 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 공급신뢰도(적정도, adequacy)와 전력계통이 갑작스러운 왜란에 대해 안정한 상태를 유지할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 안전도(security)를 포함하고 있다.

전력계통의 공급신뢰도를 평가하는 방법에는 결정론적(deterministic) 방법과 확률론적(probabilistic) 방법이 있는데, 통상적으로 (N-n) 상정사고 해석에 의한 공급지장전력과 고장 발생빈도와 지속시간에 의해 결정되는 고장확률(FOR) 등을 이용하여 공급지장과 관련된 확률, 시간, 전력, 전력량 등의 지수를 산정한다.

이러한 지수들은 전력계통 계획 및 운영측면에서 직간접적으로 활용될 수 있으나, 전력계통에서 임의의 기간동안 발생할 수 있는 공급지장 유발고장의 수나 각각의 경우에 대한 공급지장전력, 고장지속시간 등 설비고장의 불확실성으로 인해 활용상 많은 제약이 따른다.

본 논문에서는 송전계통 계획이나 운영측면에서 신뢰도기준이나 관리지표로 활용할 수 있는 설비고장의 불확실성을 고려한 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선을 제안하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 확률론적 공급신뢰도 지수

확률론적 공급신뢰도 평가기술은 전력계통의 불확실성을 고려하여 공급지장과 관련된 확률, 빈도(건수), 시간, 전력, 전력량(에너지) 등을 산정하는 기술이다. 확률론적 공급신뢰도 지수로는 공급지장 확률(LOLP, PLC), 공급지장 시간(LOLE, EDLC), 공급지장 전력(EDNS, EUD), 공급지장 에너지(LOEE, EENS) 등이 널리 사용되고 있는데, 전력설비의 고장확률(FOR) 및 상정사고 깊이에 따른 전력계통의 공급지장 정도와 밀접한 관계가 있다. (그림 1)은 확률론적 공급신뢰도 지수사이의 상관관계를 나타낸 것이다.

2.2 송전계통의 확률론적 공급신뢰도 지수

송전계통의 기본임무는 발전계통에서 생산한 전력에너지를 부하계통의 수용가에게 전달하는 전력수송이다. 따라서 송전계통의 확률론적 공급신뢰도 지수는 전력에너지의 전달능력이 어느 정도인가를 잘 나타낼 수 있어야만 한다.

현재 우리나라는 고장건수와 전원측에서 바라본 호당 정전시간 등으로 송전계통의 공급신뢰도를 관리하고 있는데, 이러한 지수들은 공급지장의 발생확률만을 의미하며, 공급지장이 계통에 미치는 충격도(Impact)를 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서 송전계통의 확률론적 공급신뢰도 지수로는 공급지장의 발생확률뿐만 아니라 공급지장이 계통에 미치는 충격도까지 고려하는 공급지장에너지(EENS)가 효과적일 수 있다.

그러나, 공급지장에너지는 일반적으로 규모가 큰 전력계통이 상대적으로 큰 공급지장에너지를 가지기 때문에 타 계통간의, 타 국가간의 절대적인 비교가 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 이유로 해서 국외에서는 공급지장에너지와 특정년도 대상계통의 최대전력, 또는 연간 총 공급에너지간의 비를 의미하는 정규화된 공급신뢰도 지수를 사용하거나 사용을 검토하고 있는데, 계통규모에 상관없이 절대적 비교가 가능하다.

- Energy Curtailment(EC)
= 공급지장에너지 / 연간 공급에너지
- Energy Impact of Reliability(EIR)
= 1 - (공급지장에너지/연간 공급에너지)

(표 1)은 연간 총 공급에너지가 370,947,584(MWh)라고 가정했을 때, 연간 총 공급에너지와 EENS, EC, EIR 등 신뢰도지수와의 상관관계를 나타낸 것인데, 통상적으로 공급지장에너지가 연간 총 공급에너지의 0.001% 이하일 경우 전력계통이 최상의 공급신뢰도 수준을 유지하는 것으로 판단하고 있다.

한편 공급지장 유발 상정사고에는 발전기, 송전선로, 또는 발전기와 송전선로의 조합에 의한 상정사고들이 포함되는데, 이중 송전선로에 의한 공급지장만을 고려함으로써 EC 나 EIR 등을 송변전계통 설비계획이나 송변전계통 사후 공급신뢰도 평가에 활용할 수 있는 송전계통만의 확률론적 공급신뢰도 평가기준이나 관리지표로 사용할 수 있다.

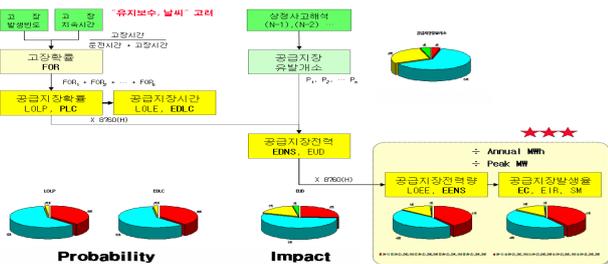
<표 1> 공급에너지, EENS, EC, EIR의 상관관계

총 공급에너지	EENS	%	EC	EIR
370,947,584	3,709,476	1	0.01	0.99
	370,948	0.1	0.001	0.999
	37,095	0.01	0.0001	0.9999
	3,709	0.001	0.00001	0.99999
	371	0.0001	0.000001	0.999999
	37	0.00001	0.0000001	0.9999999

2.3 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지의 상관관계

송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장이 유발된 경우

Case 1, Case 2, Case 3 ... Case n



<그림 1> 확률론적 공급신뢰도 지수사이의 상관관계

이고(단, 공급지장 유발고장은 서로 다른 장소에서 발생한 것으로 가정) 각각의 경우에 대한 공급지장전력과 고장지속시간이

$$(P_{Case1}, P_{Case2}, P_{Case3} \dots P_{CaseN}) (T_{Case1}, T_{Case2}, T_{Case3} \dots T_{CaseN})$$

라고 하면 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장에너지는

$$UE_{TTotal1} = P_{Case1} * T_{Case1} + P_{Case2} * T_{Case2} + \dots + P_{CaseN} * T_{CaseN} \quad (1)$$

이 된다. 동일한 송전계통에서 동일한 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장이 유발된 경우가

$$Case \ m$$

이고, Case m에 대한 공급지장전력과 고장지속시간이

$$P_m, T_m$$

이라고 하면 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 에너지는

$$UE_{TTotal2} = P_m * T_m \quad (2)$$

가 된다. 식(1)과 식(2)에서

$$P_m = P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{CaseN} \quad (3)$$

이고

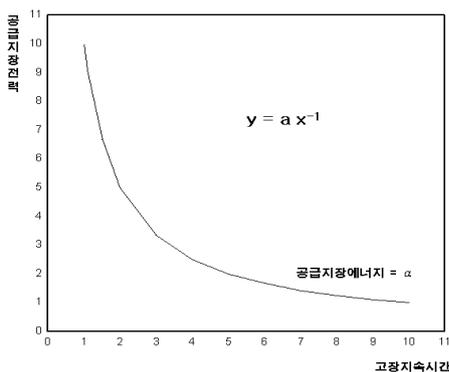
$$UE_{TTotal1} = UE_{TTotal2} \quad (4)$$

의 관계가 성립한다면 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장이 유발된 Case 1, Case 2, Case 3 ... Case n의 경우에 의한 공급지장에너지는 $P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{CaseN} = P_m$ 의 공급지장을 유발하는 Case m 이 $T_{average}$ 시간만큼 공급지장을 지속한 경우와 동일한 공급지장에너지를 가진 것으로 간주할 수 있다. 여기서

$$T_{average} = UE_{TTotal1} / (P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{CaseN}) = UE_{TTotal2} / P_m \quad (5)$$

즉 공급지장에너지 관점에서 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 n 개의 고장이 공급지장을 유발한 경우는 $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_m$ 의 공급지장을 유발하는 고장이 $T_{average}$ 시간만큼 공급지장을 지속한 경우로 등가화할 수 있다.

한편 식 (5)에서 공급지장에너지 $UE_{TTotal1}$ (또는 $UE_{TTotal2}$)가 일정한 값을 가진다고 가정하면 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지 사이의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.



<그림 2> 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지의 관계

2.4 설비고장의 불확실성을 고려한 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선

송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장을 유발할 수 있는 경우가

$$Case \ 1, Case \ 2, Case \ 3 \dots Case \ n$$

라고 하면 T_{Total} 기간동안 발생할 수 있는 고장조합은

$$\{Case \ 1\} \{Case \ 2\} \{Case \ 3\} \dots \{Case \ n\}$$

$$\begin{aligned} &\{Case \ 1, Case \ 2\} \{Case \ 1, Case \ 3\} \dots \{Case \ 1, Case \ n\} \dots \\ &\{Case \ 1, Case \ 2, Case \ 3\} \{Case \ 1, Case \ 2, Case \ 4\} \dots \\ &\dots \\ &\{Case \ 1, Case \ 2, Case \ 3, \dots, Case \ n\} \end{aligned}$$

등과 같다. 이때 동일한 고장조합을 가진다고 하더라도 Case별 고장지속시간은 다양한 조합을 생각할 수 있기 때문에 실제로 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 고려할 수 있는 고장조합의 수는 무한대가 된다.

그러나, 송전계통이 어떤 고장조합을 가지더라도, 또한 고장조합에 해당하는 Case 별 고장지속시간이 어떤 값을 가지더라도 식(1)~식(5)의 관계를 통해서 식(3)의 공급지장전력을 가지는 단일고장이 식(5)의 $T_{average}$ 시간만큼 공급지장을 지속한 경우로 등가화할 수 있고, 결과적으로 (그림 2)와 같이 공급지장전력과 고장지속시간의 2차원 평면에 나타낼 수 있다. 특히 공급지장에너지가 2.2절에서 언급한 확률론적 공급신뢰도 지수중 특정값을 가지게 된다면 $y = ax^{-1}$ 형태의 곡선으로 표현할 수 있으며, 이는 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선으로써 계통계획이나 운용측면에서 효과적으로 활용할 수 있다.

(그림 2)에서 송전계통이 T_{Total} 기간동안 가질 수 있는 최소 고장지속시간은 고장조합이 {Case 1, Case 2, Case 3 ... Case n} 인 경우로 공급지장 유발고장이 동시에 일어난 경우가 된다. 이때 고장지속시간은 최소가 되는 반면, 공급지장전력은 최대가 된다. 반면에 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 가질 수 있는 최대 고장지속시간은 (Case 1) (Case 2) {Case 3} ... {Case n}의 고장조합중에서 공급지장전력이 가장 작은 경우에 해당한다. 이때 고장지속시간은 최대가 되는 반면, 공급지장전력은 최소가 된다.

한편 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 공급지장에너지 관점에서 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 n 개의 고장이 공급지장을 유발한 경우를 $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_m$ 의 공급지장을 유발하는 고장이 $T_{average}$ 시간만큼 공급지장을 지속한 경우로 등가화한 경우이기 때문에 고장지속시간은 고장확률로 간주할 수 있다.

송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장이 유발된 경우의 수나 각각의 경우에 해당하는 공급지장전력, 고장지속시간 등 설비고장의 불확실성에 상관없이 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지간의 관계를 명확하게 나타낸 것이다.

가로축은 고장지속시간(고장확률)을 세로축은 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장을 유발할 수 있는 고장의 조합에 의해 결정되는 공급지장전력(MW)을 의미하며, 평면 위의 점은 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 고장중에서 공급지장을 유발하는 고장의 공급지장에너지를, 평면위의 곡선은 동일한 수준의 공급지장에너지를 가지게 되는 고장조건을 연결한 것이 된다.

공급신뢰도 특성곡선은 $y = ax^{-1}$ 의 형태로 계통규모(국가별, 년도별)에 상관없이 동일한 모양을 가지게 되는데, 신뢰도기준을 EIR로 사용할 경우 계통규모에 따른 연간 총공급에너지에 따라 그래프가 상하좌우로 이동할 하게 되며 고려하는 상정사고 Depth에 의한 공급지장 유발개소의 정도에 따라 공급지장전력과 고장지속시간의 범위를 결정할 수 있다. 따라서 동일한 조건에서 계통규모 및 신뢰도수준을 절대적으로 비교할 수 있는 모든 계통에 동일하게 적용할 수 있는 신뢰도지표로 활용할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 설비고장의 불확실성을 고려하여 송전계통의 공급신뢰도 특성을 명확하게 나타낼 수 있는 곡선을 제안하였다.

- ① 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 송전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장의 수나 각각의 경우에 대한 공급지장전력, 고장지속시간 등 설비고장의 불확실성에 상관없이 공급지장전력, 고장지속시간, 공급지장에너지간의 관계를 $y = ax^{-1}$ 형태의 곡선으로 나타낼 수 있다.
- ② 송전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 계통규모(년도별, 국가별)에 상관없이 동일한 모양을 가지게 되는데, Energy Impact of Reliability(EIR) 등을 확률론적 공급신뢰도 기준으로 사용함으로써 동등한 조건에서 계통규모 및 신뢰도 수준을 절대적으로 비교할 수 있는 신뢰도 지표로 계통계획이나 운용측면에서 활용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전동훈, 최재석, 김건중, "TRELSS를 이용한 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제55권 11월호, 2006.
- [2] "대규모 송전계통의 확률론적 공급신뢰도 평가 및 활용방안 연구" 최종보고서, 한전 전력연구원, 2008