

설비고장의 불확실성을 고려한 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선에 관한 연구

論 文

57-9-3

A Study on Reliability Characteristic Curve of Transmission & Substation System considering Device Fault's Uncertainty

田 東 勳^{*} · 金 建 中^{*}

(Dong-Hoon Jeon · Kern-Joong Kim)

Abstract - In this paper, we proposed new reliability characteristic curve, which can clearly show reliability property of transmission and substation system considering uncertainty such as frequency and duration of device fault. It express the relationship of duration of load curtailments, demand not supplied, and energy not served as " $y = ax^{-1}$ " curve. and we proposed the method, which can objectively assess reliability of transmission and substation system using proposed characteristic curve as new reliability index. In this method, we used energy index of reliability(EIR) as a criterion of assessment. Finally, we performed a variety of case study for KEPCO system in order to verify usefulness of proposed method.

Key Words : Power System, Uncertainty, Reliability, Characteristic Curve

1. 서 론

전력계통에서 신뢰도(Reliability)란 전력계통이 운전 제약 조건을 만족하면서 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는데, 협의의 신뢰도로 전력계통이 소비자가 요구하는 전력에너지를 공급할 수 있는 능력의 정도로 정의되는 적정도(Adequacy, 공급신뢰도)와 광의의 신뢰도로 적정도와 함께 전력계통에 갑작스러운 왜란이 발생할 때 이를 극복하고 새로운 안정적인 운전조건으로 복구하려는 능력으로 정의되는 안정도(Stability) 및 안정적인 운전상태를 유지하려는 능력의 정도로 정의되는 안전도(Security)를 포함하고 있다.[1][2]

전력계통의 신뢰도를 평가하는 방법에는 공급예비력, 계통사고, 설비고장, 소비자의 부하 등 신뢰도에 영향을 미치는 전력계통의 불확실성 고려 여부에 따라 구분되어지는 결정론적(Deterministic) 방법과 확률론적(Probabilistic) 방법이 있다.[3]

아직까지 대부분의 국가에서는 전력계통의 안정적 운용을 최우선으로 하여 계획이나 운용측면에서 상황별 Base Case와 (N-1), (N-2) 상정사고에서의 중요 상정사고 Case만을 대상으로 공급신뢰도와 안전도를 포함하는 전력계통의 신뢰도를 결정론적인 방법으로 평가하고 있다. 그러나 결정론적 방법은 전력계통의 안정운용 측면에서는 상당히 중요하지만 상대적으로 발생가능성이 작은 상태를 고려할 수 없어 과잉 투자할 우려가 있으며, 반대로 중요하지는 않지만 상대적

로 발생가능성이 큰 상태를 간과할 수 있어 신뢰도에 부정적인 영향을 미칠 소지가 있다.

이에 반하여 확률론적 방법은 대규모 전력계통에서 발생 가능한 모든 Case를 검토할 수 있는데, 상황별 Base Case는 물론 (N-1), (N-2) 상정사고에서의 모든 상정사고 Case를 대상으로 전력계통의 신뢰도를 평가하며, 필요할 경우 (N-k) 상정사고에 대한 신뢰도 평가도 가능하다. 그러나 대개의 경우 확률론적 방법은 안전도를 제외한 공급신뢰도만을 평가할 수 있기 때문에 결정론적 방법에 보완적으로 사용되고 있다. 특히 확률론적 방법은 주로 계획 측면에서 활용되어 왔는데, 운용 측면에서도 운용실적을 바탕으로 전력계통의 공급신뢰도를 사후 평가함으로써 전력계통의 공급신뢰도 수준이 어느 정도였는지, 당초 계획단계에서 사전 검토한 바대로 적절하게 운용되었는지 등을 평가해 볼 필요가 있다.

확률론적 방법에 의해 정량적으로 산출할 수 있는 전력계통의 공급신뢰도 지수로는 전력설비 고장확률(FOR, 비가용율)을 필두로 하여 전력계통에서 발생할 수 있는 공급지장과 밀접한 관계가 있는 공급지장확률, 공급지장시간, 공급지장전력, 공급지장에너지 등이 널리 사용되고 있다. 그러나, 이러한 지수들은 나름대로의 활용가치가 있음에도 불구하고, 전력계통의 공급신뢰도 특성을 객관적으로 나타내기에는 부족한 점이 있어 이를 보완할 수 있는 공급신뢰도 지수로 공급지장에너지를 전력계통의 연간 총 공급에너지, 또는 최대 전력 등으로 정규화한 EIU(Energy Index of Unreliability), EIR(Energy Index of Reliability), SM(System Minutes) 등을 함께 사용하기도 한다.[4]

이에 본 논문에서는 송변전계통에서 임의의 기간동안 발생한 공급지장 유발고장의 수나 각각의 경우에 대한 공급지장시간, 공급지장전력 등 송변전설비 고장의 불확실성을 고려하면서 송변전계통의 공급신뢰도 특성을 명확하게 표현할

[†] 교신저자, 正會員 : 韓國電力公社 電力研究院 先任研究員
E-mail : dhjeon@kepri.re.kr

^{*} 正 會 員 : 忠南大學校 電氣情報通信工學部 教授 · 工博
接受日字 : 2008年 6月 24日
最終完了 : 2008年 8月 18日

수 있는 새로운 공급신뢰도 특성곡선과 이를 이용한 송변전 계통의 공급신뢰도 평가방법을 제시하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 전력계통의 확률론적 공급신뢰도 평가

전력계통의 공급신뢰도를 확률론적인 방법으로 평가한다는 것은 전력계통이 소비자가 요구하는 전력을 공급할 수 없는 공급지장의 정도를 전력계통이 가지고 있는 불확실성을 고려하여 평가하는 것이다. 대개의 경우 공급지장과 관련되는데, 선로 과부하에 따른 교정행위(Remedial Action)로써 부하차단의 정도를 공급지장에 포함시키기도 한다.

확률론적 방법에 의해 정량적으로 산출할 수 있는 전력계통의 공급신뢰도 지수로는 전력설비 고장확률(FOR, 비가용율)을 필두로 하여 전력계통에서 발생할 수 있는 공급지장과 밀접한 관계가 있는 공급지장확률, 공급지장시간, 공급지장전력, 공급지장에너지 등이 널리 사용되고 있다. 표 1은 복합계통(HLII)에서 통용되고 있는 확률론적 공급신뢰도 지수를 정리한 것이고, 그림 1은 확률론적 공급신뢰도 지수사이의 상관관계를 나타낸 것이다.

표 1 복합계통(HLII)의 확률론적 공급신뢰도 지수
Table 1 Probabilistic Reliability Indices of HLII system

| 공급신뢰도 지수 | | 산식 | 비고 |
|----------|--|------------------------------|--------------|
| PLC | Probability of Load Curtailment | $\sum_{i \in S} P_i$ | 확률 |
| EDLC | Expected Duration of Load Curtailments | PLC * 8760 | 시간 (hr/yr) |
| EDNS | Expected Demand Not Supplied | $\sum_{i \in S} P_i C_i$ | 전력 (MW) |
| EENS | Expected Energy Not Served | $\sum_{i \in S} C_i F_i D_i$ | 전력량 (MWh/yr) |

- S : 공급지장과 관련된 모든 계통상태
- C_i : 계통상태 i 의 Load Curtailment
- P_i : 계통상태 i 의 발생확률
- F_i : 계통상태 i 의 이탈빈도
- D_i : 계통상태 i 의 지속시간

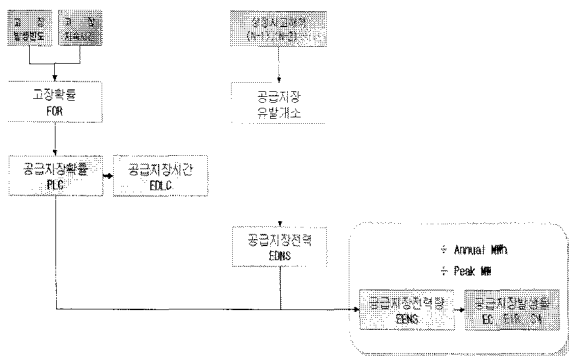


그림 1 확률론적 공급신뢰도 지수의 상관관계
Fig. 1 Relationship of Reliability Indices

표 1 및 그림 1에서 공급지장시간, 공급지장전력, 공급지장에너지 등은 공급지장 유발고장의 발생확률이 반영된 기댓값인데, 공급지장에너지의 경우 규모가 큰 전력계통이 상대적으로 큰 공급지장에너지를 가질 수 있는 개연성 때문에 년도별, 국가별 공급신뢰도를 객관적으로 비교 평가하기에는 부족한 점이 있어 공급지장에너지를 전력계통의 년간 총 공급에너지, 또는 최대전력 등으로 정규화한 EIU(Energy Index of Unreliability), EIR(Energy Index of Reliability), SM(System Minutes) 등을 함께 사용하고 있다. 표 2 및 그림 2는 년간 총 공급에너지를 403,502,330(MWh) 라고 가정했을 때, 년간 총 공급에너지, 공급지장에너지, 정규화된 공급신뢰도 지수사이의 상관관계를 나타낸 것이다.

표 2 년간 총 공급에너지, 공급지장에너지, 정규화된 공급신뢰도 지수의 상관관계

Table 2 Relationship of UE, EIU, EIR

| 총 공급에너지 (MWh/yr) | 공급지장에너지 (MWh/yr) | 공급지장에너지 / 총 공급에너지 | EIU | EIR |
|------------------|------------------|-------------------|-----------|-----------|
| 403,502,330 | 4,035,023 | 1 | 0.01 | 0.99 |
| | 403,502 | 0.1 | 0.001 | 0.999 |
| | 40,350 | 0.01 | 0.0001 | 0.9999 |
| | 4,035 | 0.001 | 0.00001 | 0.99999 |
| | 403 | 0.0001 | 0.000001 | 0.999999 |
| | 40 | 0.00001 | 0.0000001 | 0.9999999 |

- EIU(Energy Index of Unreliability)
= 공급지장에너지 / 년간 총 공급에너지
- EIR(Energy Index of Reliability)
= 1 - (공급지장에너지 / 년간 총 공급에너지)

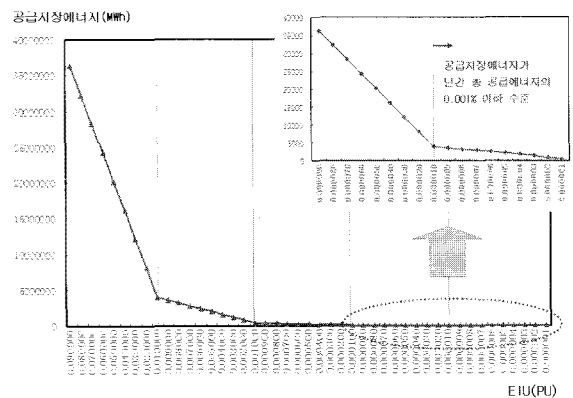


그림 2 공급지장에너지와 EIU(EIR)의 상관관계
Fig. 2 Relationship between UE and EIU(EIR)

표 2에서 EIU = 0.00001 이나 EIR = 0.99999 는 공급지장에너지가 년간 총 공급에너지의 0.001(%) 수준이라는 물리적인 의미를 가지고 있음을 알 수 있는데, 경험적으로 이러한 수준이상의 공급신뢰도를 유지할 경우 공급신뢰도 측면에서 상대적으로 우수한 전력계통인 것으로 평가되어지고 있다. 일례로 미국의 경우 일부 전력회사의 공급신뢰도가 0.0019~0.0038(%) 수준인 것으로 보고된 바 있다[4].

2.2 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선

송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장이

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

이고(단, 공급지장 유발고장은 서로 다른 설비에서 발생한 것으로 가정) 각각의 경우에 대한 공급지장전력(P)과 공급지장시간(T)이

$$P_{Case1} , P_{Case2} , P_{Case3} \dots P_{Casen}$$

$$T_{Case1} , T_{Case2} , T_{Case3} \dots T_{Casen}$$

이라고 하면 송변전계통에서 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 송변전계통에서 동일한 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장이

Case m

이고, 식(1)과 동일한 공급지장에너지를 가진다고 가정하면 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장에너지는

$$UE_{TTotal2} = P_{Casem} * T_{Casem} \quad (2)$$

P_{Casem} : Case m 에 대한 공급지장전력
 T_{Casem} : Case m 에 대한 공급지장시간

이고, 식(1)과 식(2)를 통해서

$$P_{Case1} * T_{Case1} + P_{Case2} * T_{Case2} + \dots + P_{Casen} * T_{Casen} = P_{Casem} * T_{Casem} \quad (3)$$

이 된다. 이때 식(3)에서

$$P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{Casen} = P_{Casem} \quad (4)$$

의 관계가 성립한다고 하면 T_{Casem} 은

$$T_{casem} = UE_{TTotal1} / (P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{Casen})$$

$$= UE_{TTotal2} / P_{Casem} \quad (5)$$

이 되는데, 식(1)~식(5)에서와 같이 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 n 개의 고장이 공급지장을 유발한 경우는 공급신뢰도 측면에서 $P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{Casen} = P_{Casem}$ 의 공급지장전력을 가지는 단일고장이 T_{Casem} 시간만큼 공급지장을 지속한 경우로 등가화시킬 수 있다. 즉 식(1)~식(5)의 경우에는 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장 Case 1 , Case 2 , Case 3 ... Case n 에 의한 공급

지장에너지는 $P_{Case1} + P_{Case2} + \dots + P_{Casen} = P_{Casem}$ 의 공급지장전력을 가지는 Case m 이 T_{Casem} 시간만큼 공급지장을 지속한 경우의 공급지장에너지와 동일하다고 말할 수 있다.

한편 식(1)~식(5)에서와 같이 n 개의 공급지장 유발고장을 동일한 공급지장에너지에 가지는 단일 공급지장 유발고장으로 등가화시키는 과정에서는 식(4)의 경우뿐만 아니라 다양한 공급지장전력을 가지는 단일 공급지장 유발고장을 가정할 수 있기 때문에 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 n 개의 공급지장 유발고장에 의한 공급지장에너지와 동일한 공급지장에너지를 가지는 등가화된 단일 공급지장 유발고장은 이론적으로 무한한 경우를 생각할 수 있다. 그러나, 어떤 경우라도 등가화된 단일 공급지장 유발고장의 공급지장전력 및 공급지장시간은

$$\text{공급지장에너지} = \text{공급지장전력} * \text{공급지장시간}$$

의 관계를 유지해야 하며, 여기서 모든 등가화된 단일 공급지장 유발고장은 동일한 공급지장에너지를 가지기 때문에 그림 3과 같이 $y = ax^{-1}$ 형태의 곡선으로 표현할 수 있다.

$$y = ax^{-1} \quad (a : \text{공급지장에너지}) \quad (6)$$

여기서, 식(6)을 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장에 의한 공급신뢰도 특성을 표현하는 공급신뢰도 특성곡선식이라 하고, 그림 3을 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선이라고 한다.

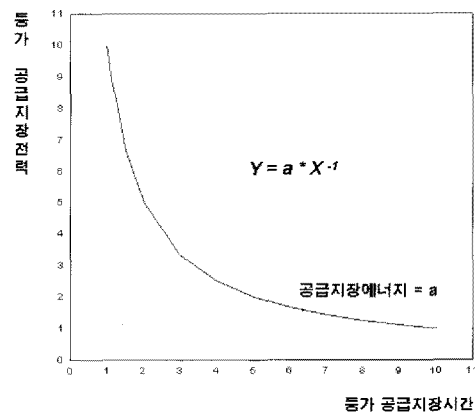


그림 3 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선
 Fig. 3 Reliability Characteristic Curve of T&S System

그림 3에서 가로축은 등가 공급지장시간을, 세로축은 등가 공급지장전력을, 그리고 곡선은 특정한 공급지장에너지 값을 가지는 등가화된 단일 공급지장 유발고장점들이 된다. 한편 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 n 개의 고장이 공급지장을 유발한 경우를 공급신뢰도 측면에서 동일한 공급지장에너지를 가지는 단일 공급지장 유발고장으로 등가화한 경우이기 때문에 등가 공급지장시간은 등가 공급지장확률로 간주 할 수 있다.

따라서, 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 송변전계통에서 T_{Total} 기간동안 발생한 공급지장 유발고장의 수나 각

각의 경우에 대한 공급지장전력, 공급지장시간 등 설비고장의 불확실성에 상관없이 공급지장전력, 공급지장시간, 공급지장에너지간의 관계를 $y = ax^{-1}$ 형태의 곡선으로 나타낸 것으로 확률론적 공급신뢰도 지수중에서 공급지장시간(공급지장확률), 공급지장전력, 공급지장에너지 등을 하나의 그래프에 모두 표시할 수 있어 송변전계통의 공급신뢰도 특성을 일목요연하게 확인할 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.3 공급신뢰도 특성곡선을 이용한 송변전계통의 공급신뢰도 평가

송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선은 운영실적으로 바탕으로 송변전계통의 공급신뢰도를 사후 평가하는데 활용할 수 있다. 이때 공급신뢰도 기준으로 정규화된 공급신뢰도 지수를 사용하는데, 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선과 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선을 비교함으로써 송변전계통의 공급신뢰도를 객관적으로 평가할 수 있으며, 공급신뢰도 여유 및 부족정도를 전력량(에너지)으로 산출할 수 있다. 평가과정은 다음과 같다.

- ① 공급신뢰도 평가를 위한 공급신뢰도 기준을 선택한다.(지수, 지수값)
 - 송변전계통의 기본임무가 발전계통에서 생산한 전력에너지를 부하계통의 소비자에게 전달하는 전력수송이라는 점과 계통규모에 따른 공급신뢰도 특성 변화를 고려할 때, 공급신뢰도 지수중에서 EIU, EIR, SM 등의 정규화된 공급신뢰도 지수가 전력에너지의 전달능력이라는 정도인가를 잘 나타낼 수 있는 송변전계통의 공급신뢰도 지수로 적합하다.
- ② 전력계통 운영실적을 이용하여 연간 총 공급에너지와 송변전계통에 의한 공급지장에너지를 계산한다.
- ③ 연간 총 공급에너지를 이용하여 ①의 과정에서 선택한 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급지장에너지를 계산한다.
 - 동일한 공급신뢰도 기준(지수, 지수값)을 사용하더라도 계통규모에 따른 연간 총 공급에너지의 변화에 따라 이에 해당하는 공급지장에너지가 달라진다.
- ④ ②의 과정에서 계산한 송변전계통에 의한 공급지장에너지와 ③의 과정에서 계산한 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급지장에너지에 대한 공급신뢰도 특성곡선을 작성하여 함께 표시한다.
- ⑤ 공급신뢰도 특성곡선을 비교하여 송변전계통의 공급신뢰도를 평가한다.
 - 송변전계통의 공급신뢰도 특성곡선이 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선의 좌측에 위치할 경우 공급신뢰도 기준을 만족하는 것으로, 우측에 위치할 경우 공급신뢰도 기준을 만족하지 못하는 것으로 평가한다.
- ⑥ 송변전계통의 공급신뢰도 여유 및 부족정도를 전력량(에너지)으로 계산한다.
 - 송변전계통의 공급신뢰도가 공급신뢰도 기준을 만족한 경우에는 여유를 (+) 전력량으로 표시하며, 공급신뢰도 기준을 만족하지 못한 경우에는 부족정도를 (-) 전력량으로 표시한다.

그림 4는 공급신뢰도 특성곡선을 이용한 송변전계통의 공급신뢰도 평가과정을 나타낸 것이다.

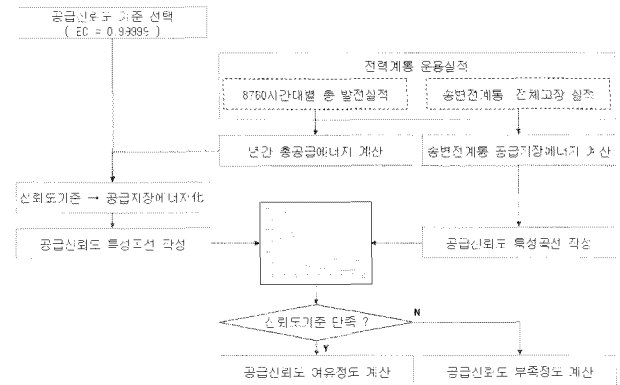


그림 4 송변전계통의 공급신뢰도 평가과정
Fig. 4 Process of Reliability Assessment of T&S System

2.4 사례연구

본 논문에서 제안한 공급신뢰도 특성곡선과 이를 이용한 송변전계통의 공급신뢰도 평가방법의 유용성을 입증하기 위하여 2007년 국내 송변전계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

- 2007년 연간 총 공급에너지 : 403,502,330(MWh)
- 2007년 송변전계통에 의한 공급지장에너지 : 1,322(MWh)

여기서 연간 총 공급에너지는 한국 전력거래소에서 입수한 2007년의 8760시간대별 총 발전실적(MWh)을 이용하여 계산하였고, 공급지장에너지는 한국전력공사에서 입수한 2007년의 송변전계통 전체고장 실적중에서 공급지장을 유발한 것으로 보고된 143건의 실적을 이용하여 계산하였다. 표 3과 표 4는 사례연구 대상계통에서 발생한 공급지장 유발고장을 각각 공급지장시간과 공급지장전력의 관점에서 분류한 것이고, 그림 5는 공급지장 유발고장의 분포를 나타낸 것이다.

표 3 공급지장유발고장의 분포(공급지장시간, 분)
Table 3 Distribution of Device Fault caused Load Loss(min)

| 공급지장시간 | ~ 5 | ~ 10 | ~ 60 | 60 ~ | 합 계 |
|--------|-----|------|------|------|-------|
| 송전설비 | 19 | 3 | 11 | 4 | 37 건 |
| 변전설비 | 82 | 13 | 10 | 1 | 106 건 |
| 합 계 | 101 | 16 | 21 | 5 | 143 건 |

표 4 공급지장유발고장의 분포(공급지장전력, MW)
Table 4 Distribution of Device Fault caused Load Loss(MW)

| 공급지장전력 | ~ 5 | ~ 10 | ~ 100 | 100 ~ | 합 계 |
|--------|-----|------|-------|-------|-------|
| 송전설비 | 8 | 6 | 20 | 3 | 37 건 |
| 변전설비 | 18 | 15 | 68 | 5 | 106 건 |
| 합 계 | 26 | 21 | 88 | 8 | 143 건 |

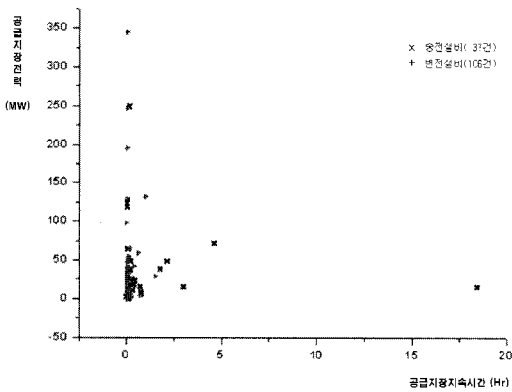


그림 5 공급지장 유발고장의 분포
Fig. 5 Distribution of Device Fault caused Load Loss

표 3, 표 4 및 그림 5를 통해서 사례연구 대상계통에서 발생한 대부분의 공급지장 유발고장이 공급지장시간 1(시간) 미만, 공급지장전력 100(MW) 이내임을 알 수 있는데, 공급지장 유발고장의 건수를 포함하는 이러한 결과들은 공급지장 발생장소(고객설비), 발생원인(천재지변, 타사파급) 등의 처리기준에 따라 큰 차이를 보일 수 있기 때문에 한국전력거래소나 한국전력공사에서 대내외적으로 사용하고 있는 자료와 다를 수 있다.

사례연구 대상계통의 공급신뢰도를 연간 총 공급에너지와 송변전계통에 의한 공급지장에너지를 이용하여 EIU(Energy Index of Unreliability), EIR(Energy Index of Reliability) 등의 신뢰도지수로 평가하였다.

- EIU = 공급지장에너지/연간 총 공급에너지 = 0.0000033
- EIR = 1- EIU = 0.9999967

EIR을 공급신뢰도 기준으로 할 경우 국외에서 사용되고 있는 경험적인 기준값인 EIR = 0.99999 보다 0.0000067 만큼 큰 값을 가지고 있어 사례연구 대상계통의 공급신뢰도가 매우 우수함을 알 수 있는데, 2007년 연간 총 공급에너지 403,502,330(MWh)를 기준으로 할 경우 EIR = 0.99999에 해당하는 공급지장에너지가 4,035(MWh)이므로 사례연구 대상계통은 공급지장에너지 관점에서 2,713(MWh)의 신뢰도 여유(Margin)를 가지고 있다고 말할 수 있다.

한편 EIR은 연간 총 공급에너지중에서 공급지장에너지가 차지하는 정도, 즉, 숫자상으로 EIR = 0.9999967은 공급지장에너지가 연간 총 공급에너지의 0.00033(%)라는 물리적인 의미를 가지고 있는데, 공급신뢰도가 절대적으로 어느 수준인지, 년도별, 국가별 공급신뢰도를 비교할 경우 상대적으로 어느 정도 차이가 있는지 명확하게 파악하기 어려운 단점이 있다.

다음 본 논문에서 제안한 방법에 의해 사례연구 대상계통의 공급지장에너지 1,322(MWh)에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선 $Y = 1322 * X^{-1}$ 와 2007년 전력계통의 연간 총 공급에너지 403,502,330(MWh)를 기준으로 EIR = 0.99999에 해당하는 공급지장에너지 4,035(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선 $Y = 4035 * X^{-1}$ 을 그림 6과 같이 도시하였다.

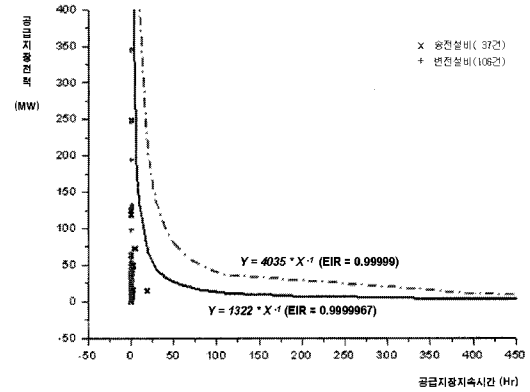


그림 6 사례연구 대상계통의 공급신뢰도 특성곡선
Fig. 6 Reliability Characteristic Curve of Case Study

그림 5와 그림 6을 통해서 사례연구 대상계통의 공급신뢰도 특성을 확인할 수 있는데, 사례연구 대상계통에서 발생한 대부분의 공급지장 유발고장이 공급신뢰도 특성곡선의 좌측에 위치하여 사례연구 대상계통의 공급신뢰도는 공급지장 유발고장의 공급지장시간보다 공급지장전력에 더 많은 영향을 받았음을 확인할 수 있다. 또한 공급신뢰도 기준을 EIR = 0.99999로 할 경우, 모든 공급지장 유발고장이 EIR = 0.99999에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선의 좌측에 위치하여 공급신뢰도 기준을 만족함을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 사례연구 대상계통의 공급지장에너지 1,322(MWh)에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선과 연간 총 공급에너지 403,502,330(MWh)를 기준으로 EIR = 0.99999에 해당하는 공급지장에너지 4,035(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선을 비교함으로써 보다 분명한 결과를 얻을 수 있다.

다음 사례연구 대상계통의 공급신뢰도 특성곡선과 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선을 비교하여 공급지장에너지 관점에서의 신뢰도 여유를 계산하였다.

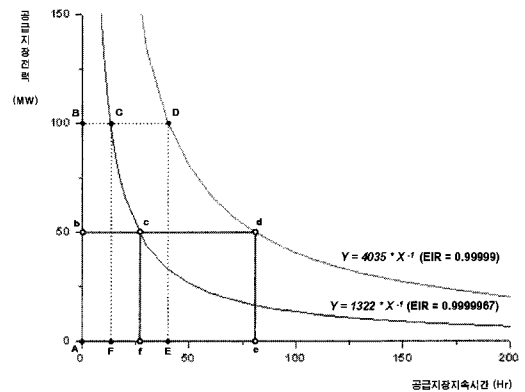


그림 7 공급신뢰도 특성곡선에서의 신뢰도여유 계산
Fig. 7 Margin Calculation in Reliability Characteristic Curve

그림 7에서와 같이 공급신뢰도 특성곡선에서는 사례연구 대상계통의 공급신뢰도 특성곡선상의 한점을 반드시 포함하는 임의의 사각형 ABCF의 면적이 공급지장에너지가 되고,

공급신뢰도 기준에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선상의 한 점을 포함하는 사각형 ABDE에서 사각형 ABCF를 뺀 사각형 CDEF의 면적이 사례연구 대상계통의 신뢰도 여유가 된다. 이러한 관계는 공급신뢰도 특성곡선상의 어떤 위치에서도 동일한 값으로 계산되는데, 실제로 사각형 ABCF의 면적과 사각형 Abcf의 면적은 동일한 값을 가지며, 사각형 CDEF의 면적과 사각형 cdef의 면적 또한 동일한 값을 가진다. 신뢰도 여유는 공급신뢰도 특성식으로부터 간단히 계산할 수 있다.

- 공급지장에너지 관점에서의 신뢰도 여유 = 2,713(MWh)

다음 본 논문에서 제안한 방법에 의해 사례연구 대상계통의 공급지장에너지 1,322(MWh)에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선 $Y = 1322 \cdot X^{-1}$ 와 2007년 전력계통의 연간 총 공급에너지 403,502,330(MWh)를 기준으로 $EIR = 0.99999$ 에 해당하는 공급지장에너지 4,035(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선 $Y = 4035 \cdot X^{-1}$, $EIR = 0.99999$ 에 해당하는 공급지장에너지 4,035(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선 $Y = 4035 \cdot X^{-1}$ 을 그림 8과 같이 표시하였다.

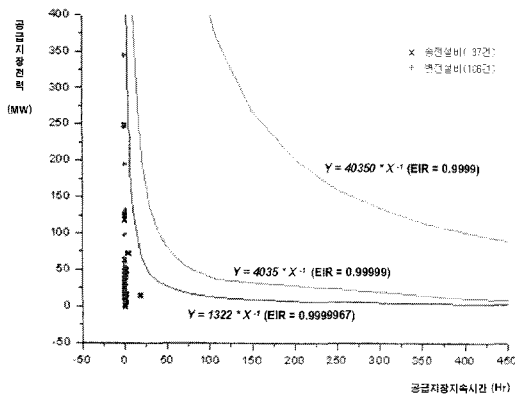


그림 8 신뢰도 기준에 따른 신뢰도여유 변화 비교
Fig. 8 Comparison of Reliability Margin's variation

그림 8에서 공급신뢰도 기준 변화에 대한 신뢰도 여유 변화의 변화를 시각적으로 확인할 수 있는데, 사례연구 대상계통의 공급지장에너지가 동일할 경우에는 공급신뢰도 기준이 $EIR = 0.99999$ 인 경우보다 $EIR = 0.9999$ 인 경우가 더욱 많은 신뢰도 여유를 가지게 된다. 이러한 결과는 향후 국내 계통 특성을 반영한 송변전설비 투자계획 수립에 활용할 수 있는 객관적인 공급신뢰도 기준값 설정에 이용할 수 있다.

다음 송변전계통의 공급신뢰도를 년도별, 국가별로 비교할 경우 동일한 공급지장에너지를 가진다고 하더라도 년도별, 국가별 전력계통의 총 공급에너지에 따라 공급신뢰도 특성이 달라질 수 있는데, 공급신뢰도 특성곡선을 이용하여 연간 총 공급에너지 변화에 따른 사례연구 대상계통의 신뢰도 여유 변화를 모의하였다. 그림 9는 공급신뢰도 특성곡선을 이용하여 연간 총 공급에너지의 변화에 따른 사례연구 대상계통의 신뢰도 여유 변화를 보인 것인데, 연간 총 공급에너지가 처음보다 약 20% 증가시킨 경우를 모의하였다.

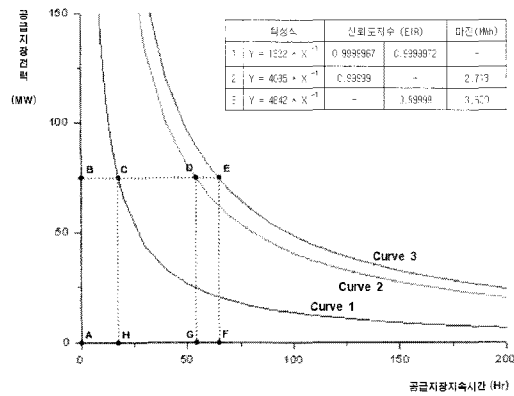


그림 9 연간 총 공급에너지에 따른 신뢰도 여유 변화 비교
Fig. 9 Comparison of Reliability Margin's variation

그림 9에서 Curve 1은 사례연구 대상계통의 공급지장에너지 1,322(MWh)에 해당하는 공급신뢰도 특성곡선, Curve 2는 연간 총 공급에너지 403,502,330(MWh)를 기준으로 $EIR = 0.99999$ 에 해당하는 공급지장에너지 4,035(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선, 그리고 Curve 3은 연간 총 공급에너지 484,202,796을 기준으로 $EIR = 0.99999$ 에 해당하는 공급지장에너지 4,82(MWh)에 대한 공급신뢰도 특성곡선이다.

그림 9에서 동일한 공급신뢰도 기준($EIR=0.99999$)을 적용하였음에도 불구하고 연간 총 공급에너지의 증가에 따라 공급신뢰도 기준에 해당하는 공급지장에너지가 4,035(MWh)에서 4,842(MWh)로 증가하고, 공급신뢰도 기준에 대한 공급신뢰도 특성곡선 또한 좌측에서 우측으로 이동하였음을 알 수 있다. 이로 인해 사례연구 대상계통의 공급지장에너지는 사각형 ABCH로 변동이 없으나, 신뢰도 여유는 동일한 신뢰도기준을 사용하였음에도 불구하고 사각형 CDGH에서 사각형 CEFH로 사각형 DEFG만큼 증가하였음을 알 수 있다.

따라서 송변전계통의 공급신뢰도를 년도별, 국가별로 비교할 경우에는 총 공급에너지의 변화에 따른 공급신뢰도 특성 변화도 고려해야 하는데, 본 논문에서 제시한 공급신뢰도 특성곡선이 이를 반영할 수 있는 객관적인 공급신뢰도 관리 지표로 활용될 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 설비고장의 불확실성을 고려하면서 송변전계통의 공급신뢰도 특성을 명확하게 표현할 수 있는 새로운 공급신뢰도 특성곡선을 제안하였다.

- ① 공급신뢰도 특성곡선은 송변전계통에서 임의의 기간동안 발생한 공급지장 유발고장의 수나 각각의 경우에 대한 공급지장시간, 공급지장전력 등 송변전설비 고장의 불확실성을 고려하면서 송변전계통의 공급신뢰도 특성을, 즉 공급지장시간, 공급지장전력, 공급지장에너지간의 관계를 $y = ax^{-1}$ 의 형태로 나타낸다.
- ② 공급신뢰도 특성곡선은 공급신뢰도 지수중에서 공급지장시간(공급지장확률), 공급지장전력, 공급지장에너지, EIU (또는 EIR) 등을 하나의 그래프에 표시할 수 있어 송변

전계통의 공급신뢰도 특성을 일목요연하게 확인할 수 있다.

- ③ 공급신뢰도 특성곡선은 EIR 등을 공급신뢰도 기준으로 함께 사용함으로써 송변전계통의 공급신뢰도를 객관적으로 비교 평가할 수 있는 새로운 공급신뢰도 관리지표로 활용할 수 있는데, 특히 공급신뢰도 여유를 전력량(MWh)으로 제공할 수 있다.

다음 공급신뢰도 특성곡선을 이용한 송변전계통의 공급신뢰도 평가방법을 제시하고, 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 국내 전력계통을 대상으로 사례연구를 수행하였다.

- ① 별도의 신뢰도평가 프로그램 없이 송변전계통에서 임의의 기간동안 발생한 공급지장 유발고장에 의한 공급지장 에너지와 총 공급에너지 정보만을 이용하여 제안한 공급신뢰도 특성곡선으로 송변전계통의 공급신뢰도를 평가하고, 전력량(MWh) 차원에서 공급신뢰도 여유도를 계산할 수 있음을 확인하였다.
- ② 송변전계통의 공급신뢰도를 년도별, 국가별로 비교할 경우 동일한 공급지장에너지를 가진다고 하더라도 년도별, 국가별 전력계통의 총 공급에너지에 따라 공급신뢰도 특성이 달라질 수 있는데, 공급신뢰도 특성곡선은 총 공급에너지에 따른 공급신뢰도 특성변화를 반영함으로써 객관적인 공급신뢰도 비교 평가에 활용 가능함을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 공급신뢰도 특성곡선은 송변전계통을 대상으로 하여 운영측면에서의 공급신뢰도 사후평가는 물론 계획측면에서의 공급신뢰도 사전평가 및 실시간 공급신뢰도 평가에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] R. Billinton, R.N.Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", 1983.
- [2] R. Billinton, R.N.Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", 1984.
- [3] R. Billinton, Wenyuan Li, "Reliability Assessment of Electric Power Systems using Monte Carlo Methods", 1994.
- [4] Y.V.Makarov, R.C.Hardiman, "Risk, Reliability, Cascading, and Restructuring", IEEE GM, 2003
- [5] 전동훈, 최재석, 김건중, "TRELSS를 이용한 우리나라 전력계통의 확률론적 신뢰도 평가에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제55권 11월호, 2006.
- [6] "대규모 송전계통의 확률론적 공급신뢰도 평가 및 활용 방안 연구" 최종보고서, 한전 전력연구원, 2008
- [7] 장기 송변전 설비계획(2006년~2020년), 2007.1, 한국전력공사 계통계획처
- [8] 2007년 송전설비 고장분석 및 대책, 2008.3, 한국전력공사 송변전운영처

저 자 소 개



전 동 훈 (田 東 勳)

1966년 12월 11일생. 1991년 홍익대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 충남대 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한전 전력연구원 선임연구원

Tel : 042-865-5882

Fax : 042-865-5804

E-Mail : dhjeon@kepri.re.kr



김 건 중 (金 建 中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 충남대학교 전기정보통신공학부 교수

Tel : 042-821-5659

Fax : 042-823-7970

E-mail : kjkim@ee.chungnam.ac.kr