

분산전원이 연계된 배전계통의 수용가 측 신뢰도 산출

조종만*·배인수**·박종진***·김진오**

전력거래소*·한양대학교 전기공학과**·전기연구원***

Reliability Calculation of the Customers in the Distribution System Connected Distributed Generation

Jong-Man Jo*·In-Su Bae**·Jong-Jin Park***·Jin-O Kim**

KPX*·Dept. of EE, Hanyang University**·KERI***

Abstract - 분산전원이 배전계통에 설치되어 운영될 경우 수용가가 경험하는 신뢰도가 증대될 것이라고 예상하는 것이 일반적이나 분산전원이 신뢰도를 높이기 위한 보조전원으로 설치될 경우 배전계통의 신뢰도를 높이지는 수 있지만, 피크부하용 전원이거나 독립전원으로 운영될 경우 배전계통의 수용가에 대한 전력공급에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 분산전원이 연계된 배전계통의 신뢰도는 공급지장 횟수와 공급지장 지속시간 등의 지수에 있어서 기존의 배전계통 신뢰도 평가 방법과는 다른 새로운 접근이 필요하다. 이에 본 논문의 목적은, 분산전원의 운영형태에 따라 배전계통 전체의 신뢰도와 각 부하점의 신뢰도를 산출하는 해석적 기법을 제시하고 분산전원으로 인한 배전계통의 신뢰도의 변화를 정량적으로 표현하는데 있다.

성을 보장 받을 수 있다는 장점이 있다. 그렇지만 최대 부하량과 최소 부하량의 차이는 일반적으로 두 배 이상이며 매시간 변하는 부하량을 일년 내내 하나의 상수로 고려한다는 것은 계통해석의 정확성을 저해하는 요소 중 하나이다.

MCS(Monte-Carlo Simulation)에서 정확하게 부하를 표현하기 위해 사용하는 방식 중 하나는 Daily Peak Load Model이다. 가중치를 이용하거나 실제 부하곡선을 1년에 대해 그리는 시간별 부하모델은 가장 정확한 부하 모델이다. 그렇지만 시간별 부하모델은 해석적 기법에 적용하기에는 무리가 따르는 것이 사실이다.

DPLVC(Daily Peak Load Variation Curve)나 LDC(Load Duration Curve)는 적정도 평가에 주로 사용되는 부하모델이다. DPLVC는 부하를 하루 단위의 피크 부하로 나타내고 LDC는 1시간 단위의 부하로 나타내는 방식으로, 시간에 따르는 순서가 아닌 부하의 크기에 따라 내림차순으로 정렬한다[3]. 본 논문에서는 해석적 기법에 이용가능하면서 시간 단위로 부하를 표현할 수 있는 LDC를 이용하여 신뢰도를 해석하였다.

1. 서 론

분산전원을 설치하는 목적은 계통설비를 확장하는 대안으로 설비되거나 전압보상, 손실감소 등의 부수적인 목적보다는, 피크부하시 전력생산을 통한 전력비용 절감 혹은 전력판매 수익(Peaking Unit)을 들 수 있다. 그 외 신뢰도 측면에서는 공급지장 발생시 중요부하에 전력을 공급하기 위해 설치하는 대기용 전원(Standby Unit)도 분산전원의 주요 설치목적 중 하나이다[1].

지금까지는 계통 사고로 인해 분산전원이 단독운전 상태일 경우 계통에서 분리시키는 것이 일반적이었다. 이런 계통구성은 분산전원이 계통의 신뢰도를 향상시키는 데 기여하지 못하는 형태이며, Standby Unit의 경우에는 신뢰도 향상이 주목적이기에 예외로 하더라도 Peaking Unit의 경우에는 오히려 계통의 신뢰도를 저해하는 경우도 발생한다.

최근의 분산전원 신뢰도 연구는 단독운전을 허용한다는 가정 하에 신뢰도를 산출하고 있으며, Standby Unit과 Peaking Unit을 따로 구분하기보단 두 가지 장점이 혼합된 방식의 추구하고 있다[2]. 그러나, 분산전원은 대규모 발전기에 비해서 일반적으로 높은 고장율을 보이며, 기동과 정지를 자주 반복하기 때문에 기동실패 확률을 고려하는 것이 필요하다. 또한 운전 중인 경우와 대기 중인 경우 사고지점에 대한 재급전 양상이 다르므로 이에 대한 고려도 필요하다. 본 논문에서는 MCS에서 고려할 수 있는 분산전원의 여러 특성들을 해석적 기법에 최대한 도입하고자 하였다.

2. 본 론

2.1 부하모델

전력계통의 신뢰도를 산출하는데 과거에 가장 널리 사용되었던 방법은 각 모선의 최대부하를 이용하는 것이다. 하나의 상수로서 간단히 사용할 수 있다는 장점 외에, 최악의 상황에서 계통을 해석하여 강인한 계통 안정

2.2 배전계통 신뢰도 지수

배전계통에서 일반적으로 사용하는 신뢰도 지수는 SAIFI, SAIDI, CAIFI 등 수용가의 수에 따라 가중치를 부여하여 공급지장 횟수와 공급지장 지속시간을 나타내는 지수이다. 이런 신뢰도 지수는 일반적으로 지속정전(Sustained Interruption)을 고려하고 있으며 순간정전(Momentary Interruption)의 영향은 무시하고 계산한다. 지속정전과 순간정전은 약 1분에서 5분 사이를 경계로 나누며, 실제 계통에서는 순간정전이 더 빈번하게 발생한다. 분산전원이 정지되어 있을 때 사고가 발생하면 기동시간이 필요하고 스위칭 시간도 분산전원이 존재하기 전보다 더 긴 시간을 필요로 한다. 이런 짧은 시간은 순간정전을 고려할 때와 고려하지 않을 때 계산되는 결과가 각각 다르게 나타난다[2]. 또한 순간정전을 고려하는 경우에도 기동시간, 스위칭 시간이 지속정전에 포함될지 순간정전에 포함될지가 또 다른 문제를 고려할 수 있도록 해석에 있어서의 이런 모호성을 제거할 수 있도록, 스위치나 분산전원의 동작이 공급지장의 횟수나 시간에 미치는 영향을 조절하여 대입한 후 결과를 비교할 수 있도록 수식을 정리하였다. MCS에서는 찾아볼 수 없는 해석적 기법의 장점은 입력값이 출력값에 어떤 영향을 미치는지 수식을 통해 살펴볼 수 있다는 점이다.

2.3 복합배전계통의 신뢰도 해석기법

2.3.1 계통구성의 간략화

배전계통의 Recloser가 사고 시에 동작할 경우 계통은 몇 개의 부분으로 나누어질 수가 있다. 즉, 사고시의 영향을 판별하는 과정에서 Recloser로 분리되는 구간 내에서는 유사한 결과가 나타난다[2]. 이러한 영역은 Zone이나 Section으로 표현하며, 하나의 Section이 동일한 신뢰

도 결과를 나타내기 위해서는 하부 지선의 고장이나 Fuse와 같은 하부 보호설비의 영향을 무시해야 한다. 이런 하부 설비의 영향은 Section에 대한 결과를 도출한 후에 선형적으로 도입할 수 있는 부분이다. 이후 모든 Feeder, Lateral, Load point는 Section의 개념으로 묶어서 표현하였으며, Section 단위까지의 신뢰도만 산출하였다.

2.3.2 사고 후 계통구성 판별

배전계통의 임의의 설비에서 고장이 발생하면 계통의 구성은 사고 전의 상황과는 달라진다. 배전계통에 전력을 공급할 수 있는 전력원은 송전계통과 연계된 변전소, 이웃계통과 연계된 N/O Switch, 분산전원 등이 있다. 이런 전력원이 어느 Section까지 전력을 공급할 수 있을지 판별하기 위해서는 전력원의 용량을 따지기 전에 계통구성을 파악하는 것이 필요하다.

설비 j 에서 고장이 발생한 후 전력원 k 와 Section i 가 연결되어 있는지 여부는 다음과 같이 표현한다.

$$A_{C,k}(i,j) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 2 \\ 3 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 2 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$A_{C,k}$ 행렬의 크기는 $i \times j$ 로서 행은 Section i , 열은 고장설비 j 를 나타낸다. 행렬 요소 0의 값은 사고 후 전력원과 Section이 연결되어 있지 않음을 뜻한다. 연결을 나타내는 두 가지 방식으로 $A_{C,k}$ 를 표현할 수 있는데, 공급용량에 제약이 없는 전력원이 연결되어 있다는 것을 숫자 1로 표현하고($A_{0,k}$), 공급용량이 작아서 제약을 고려할 경우에는 전력원의 공급 우선순위를 오름차순으로 기입하여 연결되었음을 나타낸다($A_{1,k}$).

2.3.3 Outage Duration Matrix

사고 j 로 인한 Section i 의 공급지장 횟수, 공급지장 지속시간은 배전계통 신뢰도를 평가할 수 있는 기본적인 신뢰도 값이다. 사고별로 공급지장 지속시간을 $i \times j$ 크기의 행렬형태로 표현한 것을 ODM(Outage Duration Matrix)라 하고 공급지장 횟수나 순간정전 횟수도 같은 형태로 표현가능하다[1].

다중사고를 고려하지 않을 경우, ODM의 j 열 요소 즉 사고 j 의 영향은 다른 사고 j 에 영향을 미치지 않고 서로 독립적이다. 따라서 j 에 대해 고려하는 시점에서는 j 의 정보를 필요로 하지 않으므로, 이후 모든 단계는 각 j 에 대해 표현하며 j 를 따로 표기하지 않는다.

2.3.4 사고 후 재공급 확률

전력원이 한정된 용량을 가지고 있을 경우 전력원은 미리 정한 우선순위에 따라 전력을 공급하며, 이때 공급할 수 Section의 범위는 사고가 발생한 시간의 부하 크기에 따라 달라지며 LDC를 이용하여 부하 크기에 따른 판단을 내린다.

사고 전 Section i 의 LDC를 $L_{0,i}(t)$ 라 하여 시간 t 의 함수로 표기하자. 전력원이 공급하는 전력이 부족하여 Section에서는 전력을 공급받지 못하는 시간이 발생할 수 있다. 이를 표현하면 다음과 같다.

$$L_{k,i}(t) = u \langle L_{k-1,i}(t) - P_{k,i}(t) - \delta \rangle (L_{k-1,i}(t) - P_{k,i}(t)) \quad (2)$$

$$Al_i = n, Al_i = n - 1$$

단, $Al_i = 0$ 이면,

$$L_{k,i}(t) = L_{k-1,i}(t) \quad (3)$$

여기서, $u \langle \rangle$ 는 step function으로 양수의 값은 1, 음수의 값은 0으로 반환하고, δ 는 아주 작아서 양수값이다.

$P_{k,i}(t)$ 는 전력원 k 가 Section i 에 전력을 공급하고 남은 여분의 전력을 나타내고 다음과 같이 표현한다.

$$P_{k,i}(t) = u \langle P_{k,i}(t) - L_{k-1,i}(t) - \delta \rangle (P_{k,i}(t) - L_{k-1,i}(t)) \quad (4)$$

$P_{k,0}(t)$ 는 전력원 k 의 시간에 따른 공급가능 전력을 나타내는 함수인데, 변전소나 N/O Switch, 태양광 발전, 풍력발전의 경우 시간에 따라 공급가능 전력이 변하게 표현할 수 있는 반면 연료형 분산전원의 경우에는 일정한 상수값을 가지게 될 것이다.

총 전력원의 수를 N 이라 할 때, $L_{N,i}(t)$ 는 n 을 1부터 $A_{1,k}$ 행렬 요소의 최대값까지 증가시키면서 반복계산을 수행하고 n 이 최대값에 도달하면 k 를 하나 증가시켜 다시 반복하는 과정을 통해 구할 수 있다. 결국 재공급 확률은 다음과 같다.

$$\begin{cases} r_i = 1 & L_{N,i}(T) > 0 \\ r_i = [\min(x | L_{N,i}(x) = 0)] - 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$U_i = \frac{r_i}{T} \quad (6)$$

여기서, T 는 8760시간(혹은 8736시간)을 말한다.

2.3.5 재공급 전력원의 종류에 따른 신뢰도 영향

변전소로부터의 전력과 N/O Switch로부터의 전력은 재투입 시간의 차이로 인해 순간정전에 포함될 수도 있고 지속정전에 포함될 수도 있다. 또한 공급지장 지속시간에도 전력원에 따라 차이가 발생할 수 있다. 신뢰도를 구하는데 있어서 전력원의 종류에 따른 영향이 일반화되어 있지 않아 많은 가정을 내린다. 이에 전력원 종류에 대한 공급지장 횟수, 공급지장 지속시간을 변수로 처리해서 임의로 변화를 줄 수 있도록 수식을 전개하고자 다음과 같은 가중치를 정의하였다.

$$E_i [event, effect] \quad (7)$$

함수 E_i 는 event(분산전원이 운전 중, 분산전원 기동 실패, N/O Switch 투입 등)에 따른 부하에서의 결과(스위치시간 3분 후 공급, 순간정전 1회 등)를 나타낸다.

2.3.6 분산전원의 영향과 ODM 요소 산출

사고가 발생한 시점에서 분산전원이 운전 중인지 정지 상태인지는 기동시간과 기동실패를 고려할 때 필수적이다. 운전 중인 분산전원의 경우에는 재투입 시간이 정지 중인 경우에 비해 훨씬 짧게 나타남이 분명하다. 이런 조건들은 MCS에서는 고려가능 하지만 시불변 부하를 고려하는 해석적 기법에서는 쉽지 않은 일이다. LDC를 이용하여 단계적으로 구한 $L_{k,i}(t)$ 와, 분산전원이 전력을 공급한 시간과, 분산전원은 부하량이 높은 시간대(전력 가격이 높은 시간대)에 운전한다는 특징을 이용하여 다음과 같이 분산전원의 영향을 표현하였다.

$$W_{k,i}(t) = u \langle L_{k-1,i}(t) - L_{k,i}(t) - \delta \rangle \quad (8)$$

$$a_{k,i}(t) = u \langle t - t_{n,m,k} - \delta \rangle \quad (9)$$

$$F_1 = \left[1 - \prod_{k=1}^N (1 - a_{k,i}) \right] \prod_{k=1}^N (1 - a_{k,i} W_{k,i} (1 - P_{s_k})) \quad (10)$$

$$F_2 = \left[1 - \prod_{k=1}^N (1 - a_{k,i}) \right] \sum_{k=1}^N a_{k,i} W_{k,i} (1 - P_{s_k}) \times \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq k}}^N (1 - a_{k,i} W_{k,i} (1 - P_{s_k})) \quad (11)$$

$$F_3 = \left[1 - \prod_{k=1}^N (1 - W_{k,i}) \right] \prod_{k=1}^N (1 - a_{k,i}) \quad (12)$$

$$ODM_{i,j} = \left[1 - \prod_{k=1}^{N_{intm}} (1 - A_{0,i}) \right] E_5 + \left[\prod_{k=1}^{N_{intm}} (1 - A_{0,i}) \right] [U_i E_4 + \frac{\sum_{t=(U_i T)+1}^T (F_1(t) E_1 + F_2(t) E_2 + F_3(t) E_3)}{T}] \quad (13)$$

여기서 $t_{n,m,k}$ 는 전력원 k 의 1년간 총 운전시간, P_{s_k} 는 전력원 k 의 기동실패 확률, E_i 는 식 (7)의 가중치이다. E_1 은 정지 중인 분산전원이 기동에 성공했을 때 Section

의 공급지장 지속시간의 값이고, E_2 는 기동실패시, E_3 는 분산전원이 운전 중일 때, E_4 는 어떤 전력원과도 연결이 되지 않았을 때, E_5 는 공급용량에 제약이 없는 전력원에서 전력을 공급받을 때를 각각 나타낸다. 공급지장 지속시간 대신 지속정전 횟수, 순간정전 횟수를 대입하면 그에 해당하는 Outage Frequency Matrix 요소를 구할 수 있다.

$$OD_i = \sum_{j=1}^{j_{max}} \lambda_j \times ODM_{ij} \quad (14)$$

모든 사고 j 에 대해 식 (14)와 같이 합산하면 Section i 에서의 1년 간 공급지장 지속시간을 구할 수 있다. 이를 Section 내 수용가 수로 곱해서 합산한 수 모든 수용가 수로 나누면 SAIDI가 산출되고 공급지장 횟수도 같은 방법으로 구한다. 수용가 수 대신 부하 크기를 사용하면 ASIDI 같은 지수도 구할 수 있다[2]. 단 분산전원의 고장율은 분산전원 운전시간을 고려하여 $(t_{nom,k}/T) \times \lambda_k$ 를 이용한다[3].

2.4 사례연구

분산전원의 크기, 종류, Recloser 위치 등 계통에 대한 기본데이터는 참고문헌[1]을 참조하였고, LDC를 위한 Hourly Load Data는 IEEE RTS에서 얻었다. 식 (7)의 가중치 산출 방식은 참고문헌[2]를 참조하였으며 그 데이터는 가정하여 아래와 같이 사용하였다.

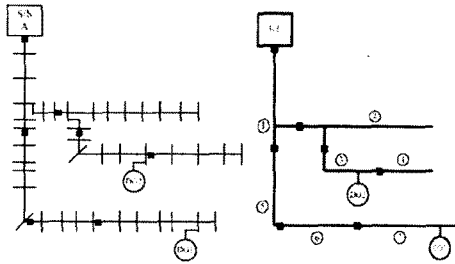


그림 1. 사례연구 계통도와 간략화된 모델

DG1 (1000kW) : $\lambda = 1f/year$, $P_S = 0.95$, $t_{nom} = 3644hour$
 DG2 (500kW) : $\lambda = 1f/year$, $P_S = 0.9$, $t_{nom} = 2557hour$
 선로 : $r = 2hour$ (1 mile당: $L_{peak} = 30kW$, $\lambda = 4f/year$)
 $t_{switch} = 5 min$, 순간정전 횟수 = 지속정전 횟수 $\times 4$
 Section 길이 = [22, 22, 10, 13.5, 13.5, 11.5, 14](mile)

변전소로부터의 전력은 제약이 없다고 가정하였고, 분산전원은 미니 가스터빈 발전기로서 스위칭 시간보다 짧은 기동시간을 가지고, 일정한 출력을 내는 용량제한 전력원으로 가정하였다. 순간정전을 고려하지 않은 경우와 순간정전을 고려한 경우로 나누어서 신뢰도 값을 구하였고, 계통전체의 지수 대신 각 Section에서의 신뢰도 값을 표현하였다. 표 1과 표 2의 괄호 속 값은 LDC 대신 최대부하를 사용하였을 때의 신뢰도 값을 나타낸다.

표 1. 순간정전을 고려하지 않은 경우

	정전 지속시간	정전 횟수
Section	1	3.520(3.520)
	2	6.942(7.040)
	3	2.870(2.870)
	4	6.964(11.385)
	5	2.531(5.680)
	6	2.200(2.200)
	7	3.551(3.551)

표 2. 순간정전을 고려한 경우

	정전 지속시간	지속정전 횟수	순간정전 횟수	
Section	1	3.520(3.520)	1.760(1.760)	7.040(7.040)
	2	6.938(7.040)	3.469(3.520)	14.131(14.080)
	3	2.683(2.683)	1.342(1.342)	16.570(16.570)
	4	6.777(11.385)	3.389(5.693)	24.759(22.771)
	5	2.432(5.680)	1.216(2.840)	10.777(11.360)
	6	2.041(2.041)	1.020(1.020)	13.623(13.623)
	7	3.340(3.340)	1.670(1.670)	19.313(19.313)

3번 Section과 7번 Section은 분산전원이 연계된 Section이다. 7번 Section의 경우 말단에 존재함에도 또 다른 말단 Section 4에 비해 신뢰도 수치가 높은 편이다. Section 4는 이웃한 Section 3에 분산전원이 있지만 DG2의 용량이 500kW로 Section 3의 최대용량 300kW를 공급하면 여유분이 작다. DG의 고장율은 운전 시간에 대해 수정되어 절반 이상 떨어지기 때문에 DG의 고장율이 Section의 고장율에 큰 영향을 미치지 않는다.

최대부하로 구한 신뢰도 값과 LDC를 통한 신뢰도 값은 Section 4에서 제일 차이가 나며, 순간고장이 지속정전으로 악화되는 상황이 자주 발생하여 오히려 Section 4의 순간정전 횟수는 최대부하를 고려할 때 더 감소하는 것을 볼 수 있다.

3. 결 론

분산전원이 연계된 배전계통에서 사고 시 발생할 수 있는 상황을 해석적 기법에 도입하는 방식을 본 논문에서는 제안하였다. 분산전원의 고장확률과 기동실패, 운전 상황, 용량제약을 고려하였으며, 상대적으로 큰 용량을 보유한 전력원의 경우에는 비계약 전력원으로 모델링이 가능하도록 하였다.

분산전원과 비계약 전력원에 대해 언급하고 있지만, 사실 지금까지 전개한 수식은 분산전원에만 국한된 얘기는 아니다. 분산전원이라는 표현보다는 오히려 에너지 제약을 가지는 전원이라고 보아도 무방하며 N/O Switch나 변전소 용량제약도 몇 가지 변수를 조절하여(가령, 기동실패 확률 0, $t_{nom,k} = 0$ 등) 수식에 이용할 수 있다. 그 외 출력이 일정하지 않은 태양광, 풍력발전 등도 표현가능하다.

감사의 글

본 연구는 기초전력연구원의 R 2004 B 220 사업의 연구비에 의하여 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] Jen-Hao Teng, Tain-Syh Luor and Yi-Hwa Liu, "Strategic distributed generator placements for service reliability improvements", Power Engineering Society Summer Meeting, vol 2, pp. 719-724, 2002
- [2] Thomas E. Mcdermott and Roger C. Dugan, "PQ, reliability, and DG", IEEE Industry Applications Magazine, 2003
- [3] Roy Billinton and Ronald N. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, Plenum Press, 2nd Edition, 1996