

분산전원 도입시 운영전략을 고려한 계통 신뢰도 분석

(Reliability of Power System Included Distributed Generation Considering Operating Strategy)

김진오* · 배인수

(Jin - O Kim · In - Su Bae)

요 약

피크용 분산전원은 계통의 전체 운영비용을 줄일 수 있고, 대기용 분산전원은 수용가의 신뢰도를 향상시킬 수 있다. 피크용 분산전원과 대기용 분산전원은 해석하는데 있어서 다른 모델링을 세워야 하고 그에 따라 다른 방식으로 해석해야 하는데 이를 구현하기 위해서는 Monte-Carlo 시뮬레이션 기법이 적합하다고 할 수 있다. 본 논문에서는 순차적 시뮬레이션 기법을 통해 두 가지 분산전원의 영향을 신뢰도 지수로 표현하고 이를 통해 두 가지 분산전원의 장단점을 살펴보도록 하겠다.

Abstract

Using DG for peak-shaving unit could reduce the overall system operating cost, and using DG for standby power unit could improve the reliability of the distribution system. The models of peak-shaving unit and standby power unit are different from each other. The Monte-Carlo simulation is suitable for the purpose of the analysis of two DG models. In this paper, the reliability indices are calculated from the time-sequential method, and the merit and defect of the peak-shaving unit and standby power unit are investigated

Key Words : distributed generation (DG), reliability worth, distribution system, time sequential simulation

1. 서 론

현재 분산전원을 전력시장에서 활용하는 방법으로는 Heat and Power, Standby Power, Peak-Shaving, Grid Support, Stand Alone 등이 있다. 그리고 태양광 발전기, 풍력터빈 발전기, 연료전지, 소형·극소형 터빈 발전기, 내부연소엔진 발전기, 왕복기관 발전기 등

이 분산전원으로 사용되고 있는 실정이다.

분산전원이 포함된 배전계통의 신뢰도를 평가하는 방법으로는 해석적인 방법과 시뮬레이션 방법이 있다. 해석적인 방법은 기본적인 신뢰도 지수(정전 발생빈도, 정전 지속시간 등)를 산정하는데 있어서는 편리한 기법이지만, 계통 매개변수의 시변(Time-Varying) 특성과 불확실성을 도입하기 힘들다는 단점이 있다. 반면, 시뮬레이션 방법은 계산시간이 오래 걸린다는 단점이 있지만, 시간에 따른 연대기적(Chronological) 특성과 랜덤(Random) 특성을 도입할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 순차적(Time-Sequential) 시뮬레이션 기법을

* 주저자 : 한양대학교 전자전기공학부 부교수

Tel : 02-2290-0347 Fax : 02-2281-9912

E-mail : jokim@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2003년 2월 21일

1차심사 : 2003년 2월 28일

심사완료 : 2003년 6월 2일

이용하여 분산전원이 포함된 배전계통의 신뢰도를 평가할 것이다.

2. 분산전원 운영전략

배전계통에 연계되어 있는 분산전원을 활용하는 방법에는 여러 가지가 있지만, 본 논문에서는 Standby Power 전략과 Peak-Shaving 전략 두 가지 활용법을 고려하였다.

피크용(Peak-Shaving) 분산전원은 배전계통의 운영비용을 줄일 수 있는 방법이라 할 수 있다. 전력 시장에서 배전계통을 운영하는 배전회사의 입장에서 보면, 송전계통을 통해 구입하는 전력은 수요가 증가하고 이용가능한 발전설비가 감소함에 따라 전력 구입비용이 증가하는 특성을 가진다. 즉 피크부하에 가까울수록 송전계통으로부터의 전력비용은 2차 함수적으로 급속히 증가하게 된다. 분산전원의 운전을 통해 값비싼 전력구입을 회피하여 전체 배전계통의 운영비용을 줄이는 것이 피크용 분산전원의 설치목적이라 할 수 있다.

대기용(Standby Power) 분산전원은 배전계통의 신뢰도를 높일 수 있는 방법이다. 정전이나 전력품질 저하에 대해 민감한 배전계통, 즉 공급지장에 의한 수요자의 피해정도를 나타내는 정전비용(Interruption Cost)이 높은 배전계통에서는, 대기용 분산전원을 설치하여 계통의 사고에 대비하게 된다. 대기용 분산전원은 배전계통이 정상상태일 때는 정지상태로 대기하다가, 사고로 인해 공급지장이 발생할 경우에 운전을 시작하여 필요한 곳에 전력을 재공급하게 된다. 결국, 대기용 운영전략은 정전을 대비한 예비력을 확보하여 계통의 신뢰도를 높이고 정전비용을 감소시키고자 하는 전략이다[1].

3. 계통 모델링

3.1 배전계통 구성요소 모델링

본 논문에서는 2-State 모델을 적용하여, 배전계통의 구성요소를 On 상태와 Off 상태 두 단계로 구분하였다. 날씨에 의한 영향을 고려하기 위해 평상날씨(Normal), 가혹날씨(Adverse) 두 가지로 날씨

를 구분하였고, 각 날씨에서의 파라미터 평균값은 상수라고 가정하였다. 또한 1년을 총 8760시간으로 나누어 1시간 동안의 고장율(Failure Rate)과 수리율(Repair Rate)은 변하지 않는다고 가정하였으며, 파라미터의 불확실성(Uncertainty)을 나타내기 위해 TTF(Time To Failure)는 지수분포, TTR(Time To Repair)는 로그-정규분포, TTS(Time To Switch)는 정규분포를 가진다고 가정하였다.

시변(Time-varying) 고장율 $\lambda(t)$ 는 다음 식과 같이 평상날씨 상태에서의 평균 고장율에 날씨에 의한 가중치를 부여하여 구한다.

$$\lambda(t) = f_{\lambda w}(t) \times \lambda_n \quad (1)$$

여기서, $f_{\lambda w}(t)$ 는 고장율-날씨 가중치(Failure Rate-Weather Factor), λ_n 은 평상날씨에서의 고장율이다.

시변 수리시간(Restoration Time) $r(t)$ 는 날씨뿐만 아니라 고장이 발생한 시간대와 요일, 계절에 따라 다른 값을 가진다. 즉 어느 시간에 고장이 발생하는지에 따라 수리에 이용할 수 있는 인적, 물적 자원이 달라지고 수리과정, 절차에도 영향을 미치게 된다. 이런 두 가지 가중치는 모두 과거의 고장수리 경험을 통해 구한다. 날씨의 영향은 수리시간-날씨 가중치 (Restoration Time-Weather Factor) $f_{rw}(t)$ 로 나타내고, 고장 발생시간에 따른 영향은 수리시간-일 가중치(Restoration Time-Day Factor) $f_{rd}(d)$ 와 수리시간-시간 가중치(Restoration Time-Hour Factor) $f_{rh}(t)$ 로 나타낸다. 시간 t 에서의 수리시간은 다음 식을 통해 구한다.

$$r(t) = f_{rw}(t) \times f_{rd}(d) \times f_{rh}(t) \times r_n \quad (2)$$

여기서, r_n 은 평상날씨 상태에서의 평균 수리시간이다.

3.2 부하 모델링

일반적으로, 시뮬레이션 방법에서 사용하는 부하

모델은 일년을 8760시간으로 나누어서 각 시간에 대한 부하량을 계산한다(IEEE-RTS 부하모델). 그렇지만 각 부하점의 특성을 나타내지는 못하고 전체 계통의 부하가 일률적으로 증가하고 감소하는 형태를 띠게 되므로, 부하점 단위의 정확한 모델링은 위해서는 각 부하점의 종류(주거형, 산업형, 상업형 등)에 따른 영향을 고려하여야 한다.

시간 t 에서 부하점 i 의 부하량 $L_i(t)$ 는 다음 식을 통해 구한다.

$$L_i(t) = L_{y,i} \times P_w(w) \times P_d(d) \times P_{h,k}(t) \quad (3)$$

여기서, $L_{y,i}$ 는 부하점 i 에서의 연간 피크부하, $P_w(w)$ 는 연간 피크부하에 대한 한 주 동안의 피크부하 백분율, $P_d(d)$ 는 한 주 동안의 피크부하에 대한 하루 피크부하 백분율, $P_{h,k}(t)$ 는 하루 피크 부하에 대한 각 시간의 부하 백분율이다.

$P_{h,k}(t)$ 는 해당 부하점의 종류 k 에 따라 다른 값을 가지게 되지만, 그 외의 백분율은 부하점 타입에 관계없이 일정하다고 가정하였다.

3.3 정전비용 모델링

1991년, 일곱 가지 종류의 수용가에 대한 정전비용을 평가하기 위해 일련의 설문조사가 진행되었다 [2]. 설문조사의 결과를 분석하여 각 수용가 종류에 따른 정전비용을 정전 지속시간에 대한 함수로 표현한 Sector Customer Damage Functions(SCDF)를 본 논문에서는 사용하였다.

단지 SCDF만을 이용하여 정전비용을 구할 경우 각 수용가의 정전비용은 수용가 종류와 정전 지속시간에만 의존하게 된다. 그러나 실제 계통의 특성을 살펴보면 앞에서 언급한 두 가지 변수 이외에도 정전이 발생한 시간에 따라 정전비용이 상이하다는 것을 살펴볼 수 있다. 따라서 각 시간에 따른 정전비용 특성을 정확히 나타내기 위해서는 정전이 발생한 주, 일, 시간에 따라 정전비용에 가중치를 부여하여 시변 정전비용을 구해야 하므로, 본 논문에서는 하루 중 정전이 발생한 시간에 따른 가중치(Interruption

Cost-Hour Factor)를 도입하였다. SCDF에서 산출한 단위 전력량에 대한 정전비용 pc 와 정전비용-시간 가중치 $f_{ch}(t)$ 를 이용하여 다음 식과 같이 단위 전력량에 대한 시변 정전비용 $c(t)$ 를 산출할 수 있다.

$$c(t) = f_{ch}(t) \times pc \quad (4)$$

3.4 분산전원 모델링

배전계통에서 피크용 전략과 대기용 전략으로 사용하는 분산전원은 그림 1, 2와 같은 4-State 모델로 나타낼 수 있다.

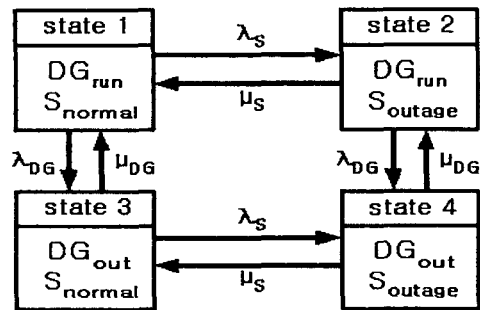


그림 1. 피크용 분산전원의 4-State 모델
Fig. 1. Four-state model of DG that is operated as Peak-Shaving

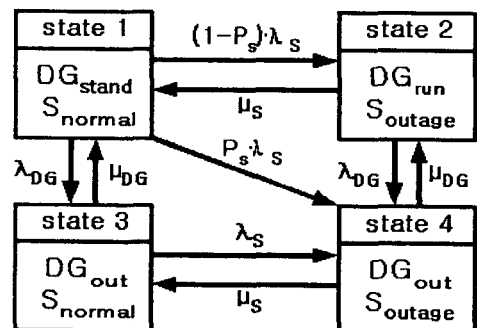


그림 2. 대기용 분산전원의 4-State 모델
Fig. 2. Four-state model of DG that is operated as Standby Power

그림에서 DG_{run} 은 분산전원이 운전하고 있는 상

분산전원 도입시 운영전략을 고려한 계통 신뢰도 분석

태, DG_{out} 은 분산전원이 고장난 상태, DG_{stand} 는 분산전원이 대기하고 있는 상태를 나타낸다. S_{normal} 은 정상 배전계통 상태, S_{outage} 는 배전계통에서 사고가 발생한 상태를 나타낸다.

각 상태간의 천이율(Transition Rate)을 살펴보면 λ_S 는 배전계통의 고장율, μ_S 는 배전계통의 수리율, λ_{DG} 는 분산전원의 고장율, μ_{DG} 는 분산전원의 수리율, P_S 는 분산전원의 기동실패 확률을 나타낸다.

4. 시뮬레이션 절차

분산전원을 포함한 배전계통에 대해 시간별 신뢰도 가치를 산출하는 시뮬레이션은 다음과 같은 절차로 이루어진다.

- ① 랜덤변수(Random Variable)를 이용하여 배전계통의 각 구성요소에 대해 TTF와 TTR를 구하고, 이를 이용하여 각 구성요소의 연간 운영이력(Operating History)을 산출한다(State Sampling Method). 결과적으로 나타나는 운영이력은 2-State 모델을 사용하였기 때문에 Up 상태와 Down 상태를 반복하게 된다.
- ② 분산전원의 TTF, TTR를 고려하여 분산전원의 연간 운영이력을 산출한다.
- ③ 앞에서 구한 계통 각 구성요소와 분산전원의 운영이력을 결합하여 계통 전체의 운영이력을 산출한다.
- ④ 각 사고 j 에 의해 영향을 받는 부하점을 구한다.
- ⑤ 랜덤변수를 이용하여 사고이벤트 j 에 대한 TTS를 구한다.
- ⑥ 사고 j 에서 부하점 i 에서의 정전 지속시간 r_{ij} , 정전 시작시간 ts_{ij} , 정전 종료시간 te_{ij} 를 구한다.
- ⑦ 정전 지속시간 r_{ij} 와 부하점 i 의 수용가 종류를 SCDF에 대입하여 단위 전력량에 대한 정전비용 pc_{ij} 를 다음 식과 같이 구한다.

$$pc_{ij} = f(r_{ij}) \quad (5)$$

- ⑧ 정전이 지속되는 시간대를 고려하여 각 시간에

대한 단위 전력량에 대한 정전비용 $c_{ij}(t)$ 를 다음 식과 같이 구한다.

$$c_{ij} = f_{ch,i} \times pc_{ij} \quad ts_{ij} \leq t \leq te_{ij} \quad (6)$$

- ⑨ 사고 j 로 인한 부하점 i 의 공급지장 에너지 ENS_{ij} 와 정전비용 $COST_{ij}$ 는 다음 식과 같이 구한다.

$$ENS_{ij} = L_{r,ij} \times r_{ij} \quad ts_{ij} \leq t \leq te_{ij} \quad (7)$$

$$COST_{ij} = c_{ij} \times L_{r,ij} \quad ts_{ij} \leq t \leq te_{ij} \quad (8)$$

여기서, $L_{r,ij}$ 는 사고 j 로 인해 부하점 i 가 공급받지 못한 전력량을 말한다.

- ⑩ 부하점 i 의 정전 지속시간 r_i , 공급지장 에너지 ENS_i , 정전비용 $COST_i$ 는 다음 식과 같이 구한다.

$$r_i = \sum_{j \in J} r_{ij} \quad (9)$$

$$ENS_i = \sum_{j \in J} ENS_{ij} \quad (10)$$

$$COST_i = \sum_{j \in J} COST_{ij} \quad (11)$$

- ⑪ 모든 부하점 i 에 대해 단계 6부터 단계 10까지를 반복한다.
- ⑫ 모든 사고 j 에 대해 단계 4부터 단계 11까지를 반복한다.
- ⑬ 원하는 시뮬레이션 반복횟수에 도달할 때까지 혹은 원하는 수준의 정확도로 수렴할 때까지 단계 1로 돌아가서 반복하고, 조건을 만족한다면 다음 단계로 넘어간다.
- ⑭ 부하점 i 에 대한 평균 고장율 $\lambda_{ave,i}$, 평균 정전 지속시간 $r_{ave,i}$, 공급지장 에너지 기대치 $EENS_i$, 평균 정전비용 기대치 $ECOST_i$ 는 시뮬레이션 반복횟수 TST 에 대한 평균치를 이용하여 다음 식과 같이 구한다.

$$\lambda_{ave,i} = \frac{N_s}{TST} \quad (12)$$

$$r_{ave,i} = \frac{r_i}{N_s} \quad (13)$$

$$EENS_i = \frac{ENS_i}{TST} \quad (14)$$

$$ECOST_i = \frac{COST_i}{TST} \quad (15)$$

여기서, N_s 는 TST 동안의 총 정전횟수를 말한다.

- ⑮ 배전계통 전체에 대한 공급지장 에너지 기대치 $EENS$ 와 정전비용 기대치 $ECOST$ 는 다음 식과 같이 구한다.

$$EENS = \sum_{i=1}^N EENS_i \quad (16)$$

$$ECOST = \sum_{i=1}^N ECOST_i \quad (17)$$

여기서, N 은 배전계통의 전체 부하점 수이다.

5. 사례연구

사례연구를 위해 RBTS(Roy Billinton Test System)의 2번 모션 배전계통을 다소 변형하여 사용하였다. 그림 3에 본 논문에서 사용한 계통도를 나타내었다. RBTS 2번 모션은 총 4개의 피더를 가지는 전형적인 도시형 배전계통으로서, 기본적인 신뢰도 파라미터는 참고문헌 [3]을 참조하였다. 그리고 5.0[MW] 정격의 Micro Sized Gas Turbine Generator 1기를 분산전원으로 부하점 15와 부하점 22 사이에 연결하였다[4].

사례연구의 제일 첫번째 단계로서, 분산전원이 연결되어 있지 않는 계통에 대해 신뢰도 지수를 산출하였다(Case 1). 계통의 구성도나 분산전원이 연결되어 있지 않은 계통의 각 부하점 별 신뢰도를 살펴보면, 부하점 15와 부하점 22 사이에 분산전원을 연결하는 것이 가장 유리하다는 것을 알 수 있다.

Case 2에서는 대기용 분산전원을 연결하여 계통을 운영한다. 분산전원은 정지상태에서 대기하고 있고 정

전이 발생하여 분산전원의 전력을 필요로 할 시에 가능한 용량만큼의 전력을 정전지역에 공급하게 된다.

Case 3에서는 피크용 분산전원을 연결하여 계통을 운영하게 된다. 송전계통에서 공급하는 전력과 분산전원의 연료비를 비교하여 분산전원의 전력이 저렴할 경우에 분산전원은 미리 정해진 부하에 전력을 공급하는 형태이다.

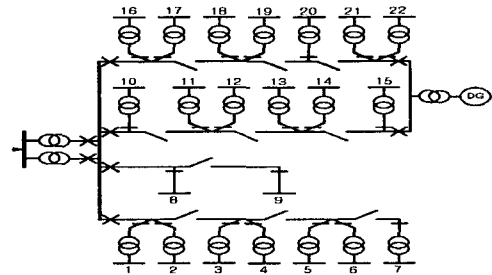


그림 3. 분산전원을 포함하는 수정된 RBTS 2번 모션 배전계통
 Fig. 3. Modified distribution system for RBTS Bus 2 including DG

앞에서 분류한 세 가지 Case에 대한 배전계통 연간 신뢰도 지수를 표 1에 나타내었다. 배전계통에서 신뢰도를 평가하기 위해 일반적으로 사용하는 수용가당 평균 정전빈도 SAIFI, 수용가당 평균 정전시간 SAIDI, 평균 공급율 ASAI, 수용가당 공급지장 전력량 기대치 AENS를 시뮬레이션을 통해 산출하였다.

표 1. 각 Case에 대한 신뢰도 지수
 Table 1. Result of reliability indices for three cases

	Case 1	Case 2	Case 3
SAIFI [횟수/년 · 수용가]	0.2979	0.3027	2.9295
SAIDI [분/년 · 수용가]	84.051	71.389	153.98
ASAI	0.999840	0.999864	0.999707
AENS [MWh/년 · 수용가]	0.010018	0.007942	0.014992

표 1의 신뢰도 지수를 살펴보면, Case 2가 SAIFI를 제외한 나머지 세 가지 신뢰도 지수가 가장 좋으므로 신뢰도를 향상시키기 위한 목적이라면 대기용 분산전원을 설치하는 것이 가장 적합하다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 분산전원이 공급지장 발생횟수를 줄여

분산전원 도입시 운영전략을 고려한 계통 신뢰도 분석

주는 역할을 제공하지 않기 때문에, 공급지장 발생 횟수인 SAIFI를 개선시킬 수는 없다. 그렇지만 분산전원을 통해 공급지장 지속시간을 감소시킬 수 있으므로, 전체적인 신뢰도는 향상된다고 볼 수 있다.

분산전원은 용량 상의 한계로 인해 배전계통 전체에 영향을 미치지 못하는 못한다. 계통 전체에 대한 신뢰도 지수나 비용 측면에서는 분산전원의 영향이 미비하게 비취질 지라도 실제 분산전원 근방의 부하점에서는 그 차이가 크게 나타나게 된다. 가령 분산전원에 인접한 부하점 22번의 연간 공급지장 전력량을 살펴보면, Case 1에서는 0.8339 [MWh/년]이고 Case 2, Case 3에서는 각각 0.5501 [MWh/년], 0.7457 [MWh/년]이다.

Case 3의 경우는, 분산전원이 상대적으로 높은 고장율을 가지기 때문에 피크용 분산전원은 계통의 신뢰도를 하락시키는 특성을 보인다. 피크용 분산전원으로 인한 비용절감 효과를 알아보기 위해 다음의 표 2에 각 비용들을 나타내었다.

표 2. 각 Case에 대한 운영비용
Table 2. Result of operating cost for three cases

k\$ / 년	Case 1	Case 2	Case 3
전력 수급비용	13,953	13,952	11,859
분산전원 운영비용		0.87	1,949
정전비용	747	675	844
총 운영비용	14,700	14,628	14,651

표 2에서 보면, Case 3에서 총 운영비용이 Case 1에 비해 절감되었지만 상대적으로 높은 정전비용으로 인해 총 운영비용은 별다른 절감 효과가 없다는 것을 알 수 있다. 배전계통과 분산전원을 운영하는 배전회사가 정전비용을 고려하지 않는 경우에는 Case 3처럼 피크용 분산전원을 설치, 운영하는 것이 가장 좋은 선택이겠지만, 신뢰도 측면까지 고려한다면 Case 2가 가장 좋은 결과를 나타낸다고 할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는, 분산전원이 설치된 배전계통의 신뢰도 지수와 운영비용을 분산전원의 운영방식에 따라 고찰하여 보았다. 이를 위한 기초단계로 분산전원 4-State 모델, 가중치를 이용한 여러 파라미터의

모델링 기법을 소개하였고, 파라미터의 불확정성과 시변 특성을 고려하기 위한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 도입하였다.

그리고 분산전원의 운영전략이 배전계통에 미치는 영향을, 세 가지 Case에 대한 사례연구를 통해 입증하였다. 신뢰도 향상을 위해선 대기용 분산전원을 설치하여야 하고 운영비용 절감을 위해서는 피크용 분산전원을 설치하여야 하지만, 송전계통으로부터의 전력수급에 비해 상대적으로 높은 고장율을 가지는 분산전원의 경우 피크용으로 사용한다 하더라도 비용절감 효과가 높지 않다는 것을 살펴보았다.

- 감사의 글 -

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

References

- [1] Gas Research Institute, "The Role of Distributed Generation in Competitive Energy Markets", Distributed Generation Forum, 1999.
- [2] G. Toefson, R. Billinton, G. Wacker, E. Chan, and J. Aweya, "A Canadian Customer survey to Assess Power system Reliability Worth", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 9, No. 1, pp. 443-450, 1991.
- [3] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, L. Goel and K. S. So, "A Reliability Test System for Educational Purpose-Basic Distribution System Data and Results", IEEE Trans. on Power systems, Vol. 6, No. 2, pp. 813-320, 1991.
- [4] R. Billinton and W. Li, Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods, Plenum Press, 1994.

◇ 저자소개 ◇

김진오 (金鎭吾)

1956년 1월 17일생. 1980년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사). 1983년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 12월 Texas A&M 대학교 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한양대학교 전자전기공학부 부교수.

배인수 (裵引洙)

1975년 2월 14일생. 1998년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.