

고효율기기의 보급확산에 따른 전력시스템 공급신뢰도의 영향분석

장승찬, 황성욱, 조형준, 김정훈, 김발호
 홍익대학교 전기제어공학과

Analysis on the Power System Reliability Characteristics according to the High-Efficient End-Use Diffusion

Chang, Seungchan Hwang, Sung-Wook Cho, Hyoung-Joon Kim, Balho Kim, Jung-Hoon
 Dept. of Electrical Engineering, Hong-ik University Seoul, Korea

Abstract - The probabilistic production simulation of power system generally has been used to formulate a reasonable power production plan or generation planning. It integrates the convolution process of a generating unit's random outage(FOR) with equivalent load duration curve(ELDC), and provides the reliability indices of power system.

This paper presents the reliability characteristics of power system reflected on demand side management and proposes the modified ELDC representation technique due to the high-efficient end-use diffusion among the customers. Load reductions are simulated from the multi-state deconvolution process with the saved capacity of end-use. Case study shows the computed reliability from the power system production simulation incorporated with DSM planning scheme.

1. 서 론

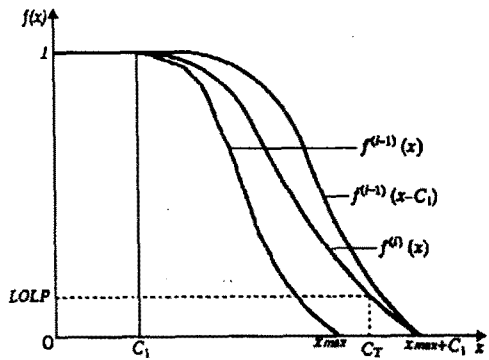
70년대로부터 급진적인 산업의 성장으로 인해 지속적으로 증가해온 전력소비를 충당하기 위해서는 공급능력 또한 증진되어야 함이 마땅하지만, 전력공급설비 즉, 발전소의 건설은 입지 확보의 문제, 투자재원 조달의 문제, 환경 문제 등으로 인해 쉽게 해결될 수 없는 상황이다. 이러한 공급측면에서의 대응과 달리 전력수요를 만족시키기 위해 수요측면에서 그 해결책을 고려하는 방법이 바로 DSM(Demand-Side Management)이다. 최근까지 다양한 DSM 프로그램이 도입되었고, 이와 함께 DSM을 활성화시키기 위해 시장에 대한 종합적인 평가를 수행할 수 있는 DSM 모니터링 시스템의 연구가 활발히 진행되어 왔다. 매우 다양한 DSM 프로그램 가운데 고효율기기의 채택은 효율적인 프로그램의 하나로 그 영향평가가 또한 바람직한 방향으로 수행되어 왔다. 고효율기기의 종류 및 보급 시나리오에 따라 다양한 보급곡선이 나타나게 되며, 이에 대한 모니터링 과정을 통하여 각 보급추이별로 최대부하 및 전력량의 절전 잠재량을 추정할 수 있게 된다. 이러한 절전 잠재량의 증가는 부하곡선의 변화를 가져오며 이에 따라 전력시스템의 공급신뢰도가 달라지게 된다. 즉, 정해진 발전설비용량에 대해 전력수요가 감소하게 되므로 공급장치가 감소하여 공급신뢰도의 향상을 가져온다고 할 수 있다.

전력시스템의 확률적 운전모형은 일반적으로 등가화된 부하지속곡선을 이용하여 개별 발전기 또는 발전기군별 고장정지율을 상승적분(convolution) 과정을 통해 반영하여 대상 시스템의 공급지장확률과 공급지장에너지를 구하여 전력시스템 운용을 보다 효율적으로 행하기 위한 수단으로 사용되어지고 있다. 본 논문에서는 전력수요관리 중 에너지절약 프로그램이 고려되었을 때 전력시스템의 등가부하표현과 이에 따른 공급지장확률 등을 계산함

으로써 전력시스템 공급신뢰도에 대한 영향평가를 고찰하고자 한다. DSM이 반영된 등가부하는 부하지속곡선 상에서 다상태 역상승적분(multi-state deconvolution) 과정을 이용하여 고효율기기 보급에 따른 부하절감 이 고려되었으며, 이 때 고효율기기의 보급확산용량 추정은 본 논문에 선행되어진 연구 결과를 이용하였다[1]. 사례연구를 통해 얻어진 연구 결과를 비추어 볼 때 향후 전력수요관리를 반영한 확률적 운전비용계산 및 전원개발계획에 유용한 도구로 사용되리라 여겨진다.

2. 전력시스템의 확률적 운전 모형

기간이 주어진 부하를 시간에 관계없이 크기순으로 배열한 후 주어진 기간을 시간 축과 부하의 크기 축을 바꾼 후 시간 축을 주어진 시간으로 나누면 전도된 부하지속곡선(Inverted Load Duration Curve)이 구해진다.



〈그림1〉 등가부하지속곡선

수요를 충족시키기 위하여 발전기의 평균연료 소모율이 낮은 순으로 부하에 투입되어 부하를 공급한다. 등가부하지속곡선(ELDC)은 부하에 투입된 각 발전기들의 고장정지율(FOR)을 고려하여 나타내며 유효부하(effective load)의 원리를 이용한다. 유효부하는 발전기의 FOR을 q_i 라고 하면 q_i 의 확률로 발전기의 용량(C_i)만큼 부하에 더해지는 원리를 이용하며 정상 가동될 확률이 부하곡선을 곱하고 돌발사고정지될 확률에 C_i 만큼 좌로 이동한 부하곡선에 곱한 후 더하면 설비용량보다 큰 값을 가진 등가부하지속곡선이 나타난다. 상승적분 형태로 표현하면 다음 식(1)과 같다.

$$f^{(i)}(x) = p_i f^{(i-1)}(x) + q_i f^{(i-1)}(x - C_i) \quad (1)$$

〈그림1〉은 설비용량이 최대부하보다 클 때를 표현하

고 있으며, 만약 부하를 공급하는 발전기가 n 대라고 하면 n 번째까지 상승적분을 수행했을 때 부하를 공급하지 못하는 확률을 공급지장확률(LOLP)라 하며 식(2)와 같이 나타낸다.

$$LOLP = f^{(n)}(C_T) \quad (2)$$

이 때, 부하를 공급하지 못하는 에너지(EENS : the Expected Energy Not Supplied)를 구하면 다음과 같다.

$$EENS = T \int_{C_T}^{x_{max} + C_T} f^{(n)}(x) dx \quad (3)$$

확률적 운전 시뮬레이션 과정은 일반적으로 다음과 같은 순서에 따른다.

1. 부하자료 가공과 부하지속곡선의 구성
2. 부하를 공급하는 발전기의 우선 순위를 결정하고 평균 연료소모율이 낮은 것부터 높은 순서로 두고 상위 부하는 나중에 투입
3. 식(4)와 같이 부하에 할당되는 순서에 의해서 발전기들이 동작되도록 투입될 때 에너지 출력을 계산

$$E_{gi} = T p_i \int_{x_{i-1}}^{x_i} f^{(i-1)}(x) dx \quad (4)$$

4. 상승적분을 이용하여 등가부하곡선을 수정
5. 신뢰도지수 계산
6. 시스템의 연료 소모율과 각 발전기들의 에너지출력 비용을 분석

3. 고효율기기 보급에 따른 등가부하 표현

3.1 고효율기기의 등가부하지속곡선

고효율기기의 보급을 고려한 전력시스템의 등가부하지속곡선(ELDC)은 앞 장에서 언급한 바와 마찬가지로의 절감량을 등가부하화하여 원래의 등가부하지속곡선에서 빼는 원리로 간단히 표현할 수 있다. 본 연구를 위한 고효율기기의 보급확산 용량 추정은 다음과 같이 선행되어진 연구 결과를 이용하였다[1].

고효율기기 보급용량을 추정하는 데에 있어서는 채택 방법에 따라 크게 세 가지로 구분할 수 있는데 첫째, 고효율기기가 새로 채택하여지는 신규 보급용량(New Adoption: NA) 둘째, 기존기기의 수명이 다 되어 고효율기기로 교체를 위해 채택되어지는 교체용량(Substitute Adoption: SA) 마지막으로, 기존기기의 수명이 다 되지 않았음에도 불구하고 고효율기기로 대체하기 위해 채택되어지는 대체용량(Alternative Adoption: AA)로서 표현할 수 있다. 따라서, s 계절에서 고효율기기의 총 보급용량은 식(5)와 세 가지 보급형태의 합으로 표현되며, 신규 보급용량, 교체용량, 대체용량은 각각 식(6)~(8)과 같이 표현된다.

$$DC_s = NA_s + SA_s + AA_s \quad (5)$$

$$NA_s = (FC - RC_s) \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q \cdot e^{-(p+q)t})^2} dt \quad (6)$$

$FC - RC_s$: s 계절에 고효율기기가 신규 보급될 수 있는 총 잠재시장

기기의 수명을 l 기간으로 가정할 때 기존기기의 수명이 다 되어 고효율기기로 교체를 위해 채택되어지는 교체용량 SA는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SA_s = (\Delta RC_s + \frac{\Delta AC_s}{\eta}) \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2} dt \quad (7)$$

$$\Delta RC_s = RC_{s-1} - RC_{(s-1)-1}$$

: 기존기기 수명을 고려한 s 계절에서의 교체가능 용량

$$\Delta AC_s = AC_{s-1} - AC_{(s-1)-1}$$

: s 계절에서 이미 고효율로 채택된 기기용량

기존기기의 수명이 다 되지 않았음에도 불구하고 고효율기기로 대체하기 위해 채택되어지는 대체용량 AA는 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$AA_s = \sum_{i=1}^{s-1} (\Delta RC_{s-i} + \frac{\Delta AC_{s-i}}{\eta}) \times \int_s^{s+1} \frac{p(p+q)^2 e^{-(p+q)t}}{(p+q e^{-(p+q)t})^2} dt \quad (8)$$

3.2 등가부하지속곡선의 역상승적분

고효율기기의 보급확산으로 인한 절전잠재량의 증가는 마이너스 발전기의 효과로 볼 수 있다. 즉, 발전기가 고장나면 부하를 고장난 발전기의 용량만큼 더해 나가는 원리와 마찬가지로 고효율기기의 보급확산으로 인한 부하의 감소분을 고장난 발전기의 재가동으로 취급하여 그 용량만큼 빼 나가는 것으로 볼 수 있다. 고장난 발전기가 하나씩 더해 나가는 것을 상승적분 과정으로 나타낼 수 있으므로, 이를 변형하여 그 역으로서 고장난 발전기가 재가동해 나가는 것을 역상승적분 과정으로 표현할 수 있다.

$$f^{(i-1)}(x) = \frac{f^{(i)}(x) - q_{i+1} f^{(i-1)}(x - C_b)}{p_{i+1}} \quad (9)$$

C_b : 임의의 발전기 용량

$f^{(i-1)}(x)$ 를 얻기 위해서는 $f^{(i)}(x)$ 와 $f^{(i-1)}(x - C_b)$ 를 알고 있어야 하는데, x 가 C_b 보다 작을 때는 등가부하곡선의 정의에 의해 $f^{(i-1)}(x - C_b) = 1$ 이라는 것으로 부터 실제로 구할 수가 있다.

한편, 발전군의 고려시와는 달리 고효율기기의 보급확산에 따른 효과는 계절별로 고려되어지는 기간상의 문제로 인해 다상태 역상승적분 과정을 이용하며, 그 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다. $f^{(i)}(x)$ 에서 고효율기기가 C_s 만큼 보급되었을 때 가동률을 곱한 $f^{(i-1)}(x - C_s)$ 의 각 상태의 합을 빼는 형태이다.

$$f^{(i-1)}(x) = \frac{f^{(i)}(x) - \sum_{N_i} P_s f^{(i-1)}(x - C_s)}{p_i} \quad (10)$$

P_s : 보급되는 고효율기기의 가동률

C_s : 고효율기기 보급 용량

식(2)과 식(3)을 이용하여 고효율기기의 보급확산을 고려하였을 때의 공급지장확률과 EENS를 구하여 고효율기기가 보급되지 않았을 때와 비교하여 고효율기기의 보급에 따른 전력시스템의 공급신뢰도에 대한 영향을 평가할 수 있다.

4. 사례연구

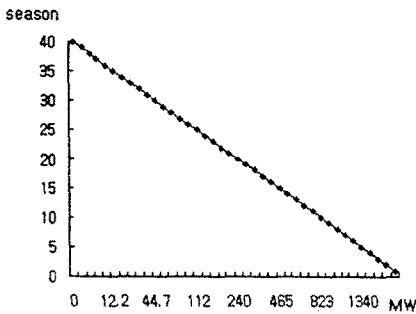
사례연구에서는 본 연구에 앞서 수행되었던 연구 결과로서 고효율기기의 하나인 유도전동기의 보급확산 및 절전 잠재량 결과를 이용하여 기기의 보급 여부에 따른 공급신뢰도의 차이를 비교하였다(1).

사용된 입력자료는 다음 <표1>과 같다(2). 10년간 계절별로 수행된 유도전동기의 10년후 절전 잠재량과 시스템 부하예측치는 각각 약 1,868MW, 약 55,000MW이며, 이들을 등가부하화하면 각각 약 47MW, 약 1,378MW이다. 네 개의 발전군이 각각 20,000MW, 16,000MW, 12,000MW, 10,000MW의 용량을 갖고 있다면, 각각 500MW, 400MW, 300MW, 250MW로 등가부하화 된다. 단, 발전군은 하나의 발전기로 가정하였다.

<표1> 입력자료

절전잠재량		1,868MW	시스템부하예측치		55,000MW
발전군 1	용량	20,000MW	발전군 2	용량	16,000MW
	p1	0.95		p2	0.98
	q1	0.05		q2	0.02
발전군 3	용량	12,000MW	발전군 4	용량	10,000MW
	p3	0.96		p4	0.97
	q3	0.04		q4	0.03

고효율 유도전동기의 보급확산에 의한 전도된(inverted) LDC는 다음 <그림2>와 같다. 고효율 유도전동기의 효율 향상률은 50%로 40계절의 보급확산을 추정하여 p 는 0.75로 고려하였다.



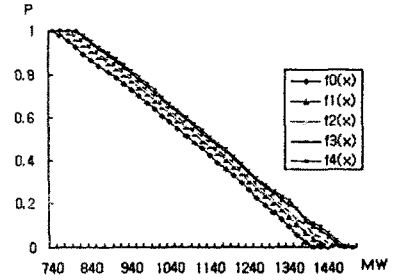
<그림2> 유도전동기 보급에 의한 전도된 LDC

식(1)을 이용하여 상승적분을 수행하였을 때, 다음 <그림3>에서와 같이 발전군 4에서 공급지장을 일으키고 있는 것을 볼 수 있으며, 식(10)을 이용하여 다상태 상승적분을 수행하였을 때, <그림4>에서 유도전동기가 보급되었을 때의 LOLP와 비교할 수 있다. 편의상 선형화하여 결과를 보였으며, 공급신뢰도를 비교한 결과는 <표2>와 같다.

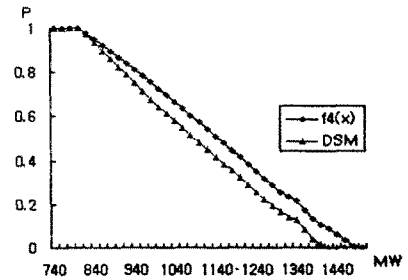
<표2> 공급신뢰도 비교

	A	B
LOLP	0.137	0.044
EENS	15,395MWh	4,891MWh

A: 유도전동기가 보급되지 않았을 때
B: 유도전동기가 보급되었을 때



<그림 3> 등가부하지속곡선 결과



<그림4> 등가부하지속곡선의 비교

고효율 유도전동기가 보급되었을 때를 그렇지 않았을 때와 비교해 보면 LOLP는 약 0.093, EENS는 약 10GWh가 낮아짐을 보여주어, 이는 75%의 가동률을 갖는 2,491MW의 발전기를 건설한 효과와 같았다. 이에 대응하는 가동률 80%의 원자력발전의 경우로 바꾸면 2,335MW 용량의 발전소를 추가 건설하지 않아도 되며, 3조 9천억원 상당의 건설비용을 회피할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 전력시스템의 확률적 운전 모형에 대한 개념을 정립하고, 고효율기기가 보급확산을 고려하였을 때의 공급지장확률을 고효율기기가 보급되지 않았을 때의 것과 비교함으로써 고효율기기의 보급으로 대표되어 지는 DSM 프로그램의 공급신뢰도에 대한 영향을 평가하여 신뢰도의 향상을 확인하였다.

사례연구를 통해 얻어진 연구 결과를 비추어 볼 때 향후 전력수요관리를 반영한 확률적 운전비용계산 및 전원개발계획에 유용한 도구로서 사용될 것으로 기대된다. 또한, 향후 에너지절약 효과를 발전군으로 고려하는 연구와 절전잠재량을 이항분포 및 정규분포로 표현하는 연구가 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김정훈 외, "DSM 모니터링 시스템을 이용한 고효율 유도전동기의 보급확산 추정 및 자료수집체계 설계에 관한 연구", 전력계통연구회, 춘계학술대회 논문집, p141~p143, 1998
- [2] 산업자원부, "DSM 잠재량 평가와 모니터링을 위한 기법 개발 및 활용방안 연구 최종보고서", p793~p809, 1998
- [3] Kim, Jung-Hoon et. al., "Development of Demand Side Management(DSM) Monitoring Methodology Considering the Diffusion Process of High Efficient End-Use Appliances", ICEE '98, p115~p118, 1998
- [4] Wang, X. et. al., "Modern Power System Planning", McGraw-Hill, p89~p185, 1994
- [5] Sullivan, R.L., "Power System Planning", McGraw-Hill, p76~p85, 1977