

신뢰도와 고조파를 고려한 배전시스템의 평가 및 계획

이범[†] · 김용하* · 최상규**

여수대학교 전자통신전기공학부, *인천대학교 전기공학과, **안양과학기술대학교 전자통신정보학부
(2004년 12월 13일 접수, 2005년 3월 14일 채택)

Evaluation and Planning of Distribution System Considering Reliability and Harmonics

Buhm Lee[†], Yong-ha Kim* and Sang-kyu Choi**

Dept. of Electrical Engineering, Yosu National University,

*Dept. of Electrical Engineering, University of Incheon

**School of Electronic, Communication and Information, Anyang Technical College

(Received 13 December 2004, Accepted 14 March 2005)

요 약

본 연구에서는 가치에 기반을 두고 배전시스템을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 우선, 신뢰도를 평가하기 위하여 VBDRA를 도입하였으며, 고조파를 평가하기 위하여 한계가격기법을 도입하였다. 그리고, 신뢰도비용, 고조파비용, 건설비용을 사용하여 가장 경제적인 대체안을 결정을 할 수 있도록 하였다. 제안한 방법을 실제시스템에 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

주요어 : 배전시스템 평가, 신뢰도, 한계가격기법

Abstract — This paper presents a methodology to support decision making for distribution system planning based on value. To evaluate the reliability value, we employ valued-based distribution reliability assessment. To evaluate the harmonics value, we employ a marginal pricing method, and by using reliability cost, harmonics cost, and construction cost, we can make the most economic decision. By applying the method to the real system, we show this method can get the best result which meet reliability and harmonics level.

Key words : Distribution system evaluation, Reliability, Marginal pricing method

1. 서 론

배전시스템을 계획하는 방법으로, 지금까지는 조류계산을 통한 시스템의 전압강하를 주요점으로 하여 왔으며, 현재 신뢰도나 전력의 품질을 감안하는 방법에 대한 연구가 진행중에 있다. 그러나, 이들 요소의 단위가 각기 달라 부하점의 신뢰도나 고조파의 영향이 어느정

도 인지를 계산할 수 있을 뿐이며, 이들 요소가 배전시스템에 어느 정도 중요함을 알기는 힘들었다.

종래에 배전시스템의 신뢰도는 고장빈도, 고장지속시간 등으로 평가^[1]하여 왔는데, 이를 비용으로 처리할 수 있는 방법인 Customer Interruption Cost(이하 CIC)^[2]가 연구되었으며, CIC를 사용하여 신뢰도를 평가할 수 있는 Value-Based Distribution Reliability Assessment(이하 VBDRA)^[3]가 개발되었다. 이 방법은 부하를 7가지 종류로 구분하고, 부하의 종류별로 정전시간에 따라 5가지의 정전비용을 계산할 수 있도록 한 것이다. 또한, 전체 신뢰도비용을 계산할 수 있도록 하고, 실제 시스템에 대해 부하 및 고장지속시간별로 CIC를 구한 연구^[4]

[†]To whom correspondence should be addressed.
Dept. of Electrical Eng., Yosu National University, San 96-1, Dundeok-Dong, Yeosu City, Jeollanam-do, Korea
Tel: 061-659-3313
E-mail: buhmlee@yosu.ac.kr

가 진행되었다.

종래에 고조파는 전력수전점을 기준으로 하여 일정한 수준을 만족시키는 방법으로 평가하여 왔다⁵⁾. 그러나, 이들 고조파는 전력시스템뿐만 아니라 배전시스템내의 부하에도 영향을 미치게 되는데, 이와 같은 각 부하점별 고조파의 영향을 부(-)의 특성을 갖는 자원으로 간주하고, 고조파조류계산을 통해 고조파가치를 계산하려는 연구⁶⁾가 있어 왔으며, 이를 비용으로 처리하고 고조파 저감장치설 설계에 활용할 수 있도록 하는 연구⁷⁾가 진행되었다.

본 연구에서는 신뢰도와 고조파를 동시에 고려하여 배전시스템을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 우선, VBDR을 사용하여 신뢰도를 비용으로 처리할 수 있도록 하였으며, 고조파의 영향을 비용으로 처리할 수 있도록 함으로써, 두가지 요소사이에서 발생하는 단위 문제를 해결하였다. 또한, 배전시스템의 다양한 대체안을 구성하고, 이들 각각에 대한 신뢰도비용, 고조파비용, 신증설비용을 계산한 다음, 이들의 총비용을 통하여 가장 합리적인 대체안을 결정할 수 있도록 하였다. 이 결과, 건설비용만으로 배전시스템을 결정하고 신뢰도나 고조파의 영향을 참고사항정도로 다루는 방법에서 더 나아가, 합리적인 신뢰도수준과 고조파영향수준을 결정할 수 있게 되었다. 제안한 방법을 현재 건설 중에 있는 배전시스템에 적용하여 본 논문의 유용성을 검증하였다.

2. 가치결정에 의한 배전시스템의 설계

2-1. 배전시스템 요소의 가치계산

2-1-1. 신뢰도비용

배전시스템에 고장이 발생하여 전력을 공급하지 못하게 되면, 부하인 소비자는 이와 관련하여 비용이 발생하게 되며, 이를 CIC로 나타낼 수 있다. 이와 관련한 비용으로는, ① 공급차단직후로 소비자가 각종 손상

을 방지하기 위한 조치를 필요로 하기 때문에 발생하는 비용, ② 고장 중으로 생산, 판매, 사무, 일, 유흥 등을 할 수 없어 발생하는 비용, ③ 고장 복구 후로 정상적인 생산, 일, 생활로 돌아가는데 필요로 하는 비용의 3단계로 나타난다¹²⁾. CIC는 부하의 종류 및 정전시간에 따라 달라지게 되는데, 부하의 특성별 CIC¹⁴⁾를 Table 1에 나타내었다.

Table 1로부터 신뢰도비용이라 할 수 있는 예상정전비용(Expected interruption cost)은 식(1)¹⁴⁾과 같이 계산하였다. 여기서, CIC는 원화로 변환하여 계산한다.

$$EC = \sum_{i=1}^N L_i \sum_{j=1}^K C_{ij} \lambda_{ij} \quad [\text{천원/yr}] \quad (1)$$

여기서,

L_i : i모선에서의 평균부하[kW]

$C_{ij}=f(r_{ij})$: r_{ij} 에 의해 발생하는 CIC

λ_{ij} : i모선, j요소의 고장률

r_{ij} : i모선, j요소의 고장지속시간[h]

N : 배전시스템의 모선의 수($i=1 \dots N$)

K : 모선에 부착된 요소의 수($j=1 \dots K$)

2-1-2. 고조파비용

h차 고조파의 가치는 식(2)와 같이 각 모선에 유입되는 h차 고조파전압의 함수로 나타낼 수 있다. 여기서, 식(2)는 부(-)의 이익으로 나타내기 때문에, 비용으로 처리가 가능하다.

$$C(|E_h|) \quad (2)$$

여기서,

$$E_h = [E_{h1} \ E_{h2} \ \dots \ E_{hn}]^T$$

E_{hi} : 모선 i에서의 h차 고조파전압[PU]

h : 고조파의 차수($h=1 \dots H$)

제약조건 중, 등호제약으로는 고조파전력방정식을, 부등호제약으로는 PCC 및 각 모선에서의 고조파전압제약을 고려한다. 이의 방법으로 각 모선의 고조파전압제약을 위반하면 고조파의 가치를 ($-\infty$)로 처리한다. 식(2)로부터 고조파비용을 계산하면 식(3)⁷⁾과 같다.

$$\mu_h I_h = K_h |E_h| = K_h [Z_h] I_h \quad (3)$$

여기서,

$$\mu_h = [\mu_{h1} \ \mu_{h2} \ \dots \ \mu_{hn}]$$

$$I_h = [I_{h1} \ I_{h2} \ \dots \ I_{hn}]^T$$

$$K_h = [k_{h1} \ k_{h2} \ \dots \ k_{hn}]$$

$$K_{hi} = \frac{\partial C(|E_{hi}|)}{\partial |E_{hi}|}$$

$[Z_h]$: h차 고조파의 Z 버스행렬

Table 1. CIC for each type of load.

부문	정전비용(\$/kW)				
	1분	20분	1시간	4시간	8시간
대규모부하	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
산업용	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
상업용	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
농사용	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120
주택용	0.001	0.093	0.482	4.914	15.69
정부, 학교	0.044	0.369	1.492	6.558	26.04
사무실, 빌딩	4.778	9.878	21.06	68.83	119.2

(단, 캐나다 달러)

μ_{ki} : 모선 i에서의 h차 고조파의 잠재가격
 I_{hi} : 모선 i에 유입되는 h차 고조파전류[PU]
 k_{hi} : 모선 i에서의 h차 고조파의 단위
 전압왜곡에 의한 한계가치[천원/PU]

식(3)으로부터 고조파비용을 계산하면 다음과 같다.

$$HC = \mu_h \cdot I_h \cdot 24 \cdot 365 \text{ [천원/yr]} \quad (4)$$

2-1-3. 설비비용

신뢰도비용이나 고조파비용을 줄이기 위하여는 설비의 보강을 필요로 한다. 본 연구에서는 신증설비용으로 실제 건설비용을 사용하였다.

$$CC = \frac{\text{설비 신증설 비용}}{\text{설비의 수명}} \text{ [천원/yr]} \quad (5)$$

2-2. 배전시스템의 신·증설 설계

2-2-1. 목적함수

배전시스템을 건설하는 사람의 입장에서는 저렴한 가격에 건설하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다. 반면, 운영하는 사람의 입장에서는 고장이 작고, 고조파문제가 발생하지 않는 배전시스템의 건설이 중요하다 할 것이다. 그러므로, 본 연구에서는 이들을 모두를 비용으로 처리하여 집계함으로써 식(6)과 같이 총비용을 계산하였으며, 이로써 목적함수를 구성하였다.

$$\text{Min } F = EC + HC + CC \text{ [천원/yr]} \quad (6)$$

2-2-2. 대체안의 구성

식(6)의 총비용을 최소로 하는 시스템을 계획하면, 가장 합리적인 건설이 이루어진다고 할 수 있으나, 식(6)을 직접적으로 푸는 것은 매우 어렵다. 그러므로, 본 연구에서는 배전시스템에 전력을 공급하기 위하여 가능한 신·증설 방법 모두를 대체안으로 제시하는 방법을 사용하였다. 그러나, 이와 같이 하여 만들어진 무수히 많은 대체안을 모두 평가하는 것은 비효율적이기 때문에, 입안자의 전문성에 의존하여 실현가능한 대체안으로만 한정토록 하였다.

2-2-3. 최적 대체안의 결정

앞서 만들어진 모든 대체안을 대상으로 하여 식(6)을 사용하여 계산하면, 각 대체안에 대한 경제성을 평가할 수 있다. 이들 대체안들 중 가장 경제성을 갖는 대체안이 최적의 대체안이 된다.

$$\text{Min} \{F_1, F_2, \dots, F_n\} \quad (7)$$

여기서,

F_i : i 대체안의 총비용($i=1 \dots n$)

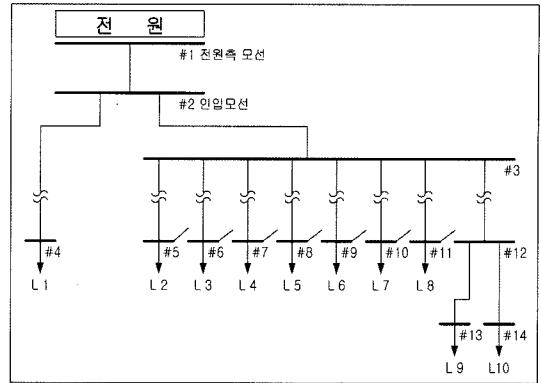


Fig. 1. Model system.

Table 2. Types of loads and constants.

부하점	부하종류	크기[kVA]	K_{Si}
L1	전동기부하	350	-150
L2	전동기부하	1100	-150
L3	전동기부하	1100	-150
L4	전동기부하	1100	-150
L5	조명부하	600	-200
L6	조명부하	600	-200
L7	통신기기부하	500	-700
L8	정밀기기부하	300	-900
L9	정류기부하	500	-30
L10	정류기부하	500	-30

3. 사례연구

3-1. 시스템자료

모델시스템으로는 현재 건설중인 시스템은 Fig. 1과 같이 10개의 부하점을 갖고 있으며, 이들 부하의 크기 및는 Table 2와 같으며, 만을 대상으로 하였다.

여기서, Fig. 1을 수정하여 가장 경제적인 변압기 및 단로기의 설계를 하고자 한다.

부하종류별 차단비용은 Table 1의 값을 확률의 단위만 변경하여 사용($1S=800$ 원)하였으며, 기기의 고조파 영향을 나타내는 상수는 아직까지 일반화된 값이 개발되지 않은 관계로, 부하의 특성을 감안하여 Table 2와 같이 임의로 주었다. 또한, 이들 요소의 신뢰도자료는 옥외설비를 대상으로 한 자료^[16]를, 기기의 임피던스는 전력기기회사에서 제공하는 용량별 임피던스자료를 사용하였다.

3-2. 계산결과

Table 2의 10개 부하모선에 전력을 공급하기 위한 공

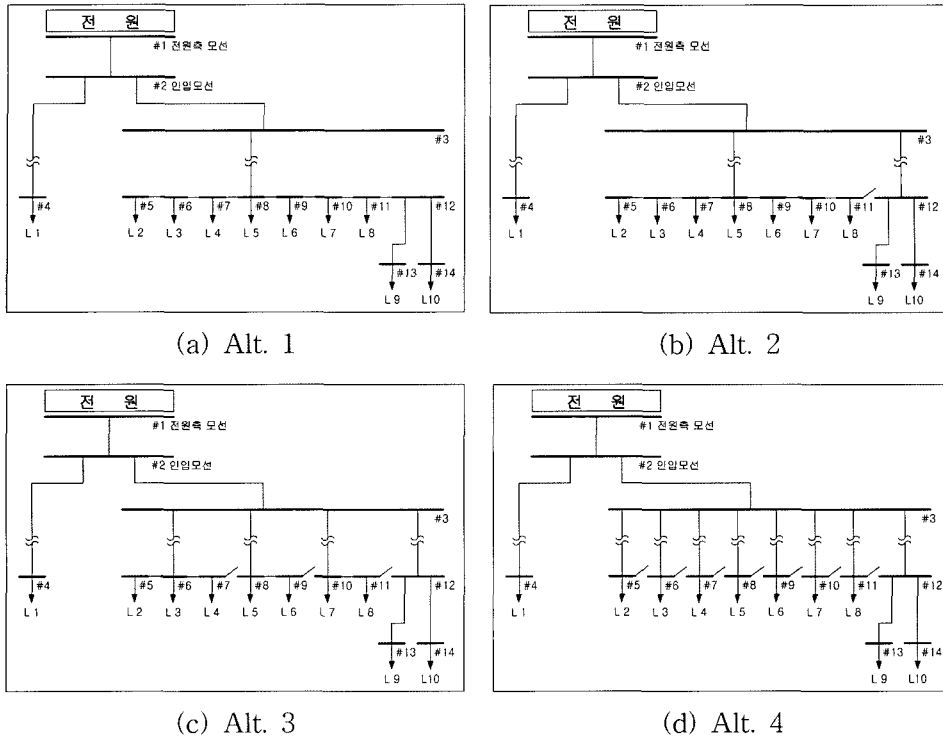


Fig. 2. System diagram for each Alt.

급설비로, Fig. 2과 같은 4가지를 대체안을 제시하였다. 여기서, 부하 1은 밀집되어 있는 부하 2~10과 거리가 떨어져 있기 때문에 별도의 변압기를 사용하였으며, 부하 2~10에 전력을 공급하기 위하여 소수의 대용량변압기 또는 다수의 소용량변압기를 사용한 것이다.

이들 각 대체안별 계산결과중 부하점의 신뢰도 및 신뢰도지수는 Table 3에, 고조파전압은 Table 4에 나타내었다. 여기서, 신뢰도 및 신뢰도지수는 계통축약법과 고

장모드-효과분석법^[11]을 사용하였으며, 고조파전압은 고조파조류계산을 통하여 계산하였다. 다만, 고조파는 2~50 조파를 대상으로 하여야 하나, 계산의 편의상 5조파만 으로 한정하여 계산하였다.

Table 3으로부터 하나의 대형변압기로부터 전력을 공급하는 경우보다 여러대의 소형변압기로부터 전력을 공급하는 경우에서 SAIFI, SAIDI, ASAI, ENS, AENS가 개선됨(Alt. 4>Alt. 3>Alt. 2>Alt. 2)을 알 수 있다. 즉, 부

Table 3. Reliability and its indices.

(a) Reliability of load point				(b) Reliability indices of the system									
부하점	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4					
λ	r	λ	r	λ	r	λ	r	λ	r				
L1	.2001	33.9	.2001	33.9	.2001	33.9	.2001	33.9	SAIFI	0.20343	0.20320	0.19600	0.19165
L2	.2164	38.8	.2164	38.8	.1998	38.8	.1914	38.8	SAIDI	7.89340	7.88420	7.60600	7.43816
L3	.2081	38.8	.2081	38.8	.1914	38.8	.1914	38.8	CAIDI	38.79984	38.80003	38.80594	38.80972
L4	.1998	38.8	.1998	38.8	.1998	38.8	.1914	38.8	ASAI	0.99909	0.99910	0.99913	0.99915
L5	.1914	38.8	.1914	38.8	.1914	38.8	.1914	38.8	ASUI	0.00090	0.00090	0.00086	0.00084
L6	.1998	38.8	.1998	38.8	.1998	38.8	.1914	38.8	ENS	54.4	53.1	51.1	50.1
L7	.2081	38.8	.2081	38.8	.1914	38.8	.1914	38.8	AENS	9.7	9.5	9.1	8.9
L8	.2164	38.8	.2164	38.8	.1998	38.8	.1914	38.8					
L9	.2424	39.7	.2091	39.9	.2091	39.9	.2091	39.9					
L10	.2424	39.7	.2091	39.9	.2091	39.9	.2091	39.9					

Table 4. Harmonics voltages of load point.

부하점	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
PCC	0.97	0.97	0.97	0.97
L1	1.08	1.08	1.08	1.08
L2	1.22	1.15	1.11	1.09
L3	1.22	1.15	1.11	1.09
L4	1.22	1.15	1.11	1.09
L5	1.22	1.15	1.10	1.09
L6	1.22	1.15	1.10	1.09
L7	1.22	1.15	1.23	1.19
L8	1.22	1.15	1.23	1.16
L9	1.24	1.45	1.45	1.45
L10	1.24	1.45	1.45	1.45

하점을 기준으로 할 때, 공급시스템이 단순할수록 신뢰도가 좋아지기 때문에, 신뢰도를 개선하기 위하여는 여러개의 변압기를 설치하더라도 부하점까지의 시스템 구성을 간단히 할 필요가 있음을 알 수 있다.

신뢰도가 여러대의 변압기를 사용하면 개선되는 것과는 달리, 고조파 전압은 시스템의 구성에 따라 달라진다. 고조파는 기본파와 달리 2~50배의 조파이므로, 유도성리액티브의 특성을 갖고있는 변압기를 통과하기 힘들기 때문에 고조파발생이 많은 L9~L10에서 높은 고조파 전압을 나타낸다. L2~L10을 모두 연결한 Alt. 1에서 L9~L10의 고조파전압이 낮게 나오는데 반하여, 모선 12를 분리한 Alt. 2, 3, 4에서는 고조파전압이 높게 나옴을 알 수 있다. 즉, Alt. 1에서는 L9~L10에서 발생된 고조파가 고조파발생이 상대적으로 작은 L2~L8으로 분산되는 반면, Alt. 2, 3, 4에서는 이들을 별도의 변압기로 공급하기 때문에 분산이 작고 L9~L10에 한정되게 되어 높은 고조파전압이 유리된다. 따라서, 다른 기기에 고조파의 영향을 줄이기 위하여는 고조파 발생원을 별도의 변압기로 고립시키도록 하는 것이 유리하며, 고조파가 다른 기기에 유도되더라도 모선별 고조파영향을 줄이려면 대형변압기를 사용하고 2차측 모선을 직접 연결하는 것이 유리함을 알 수 있다.

대체안별 총 비용을계산한 결과를 Table 5에 나타내었다. 여기서 건설비는 변압기, 차단기 등의 자재비와 설

Table 5. Total cost for each Alt.

	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	Alt. 4
EC	76,326	74,838	71,928	70,537
HC	25,998	24,555	25,298	24,425
CC	10,546	12,212	16,450	24,045
EC+CC	86,872	87,050	88,378	94,582
HC+CC	36,544	36,767	41,748	48,470
EC+HC+CC	112,870	111,605	113,676	119,007

치인건비로 구성하였는데, 설치인건비는 자재비의 30%로 개략 계산하였다. 또한, 변압기 등 기기의 수명은 10~20년으로 보아야 할 것이나, 기기의 노후시 손실 등이 증가하는 것을 감안하여 기기의 수명은 10년으로 계산하였다. 즉, 10년간 감가상각하는 것만 감안하였으며, 금융비용, 보수비용 등의 제비용은 고려하지 않았다. 따라서, 설비비용은 건설비용의 1/10으로 계산하였다.

Table 5로부터 가장 우수한 대체안은 Alt. 2임을 알 수 있다. 신뢰도라는 측면에서보면 Alt. 4>3>2>1로 Alt. 4가 가장 우수하다 할 수 있으며, 고조파라는 측면에서보면 Alt. 4>2>3>1으로 Alt. 4가 가장 우수함을 알 수 있다. 반면, 설비비용은 Alt. 1>2>3>4로 Alt. 1이 가장 우수함을 나타내고 있다. 이를 종합하였을 때,

- ① 신뢰도비용만을 감안시에는 EC+CC가 86,872[천원]인 Alt. 1이 가장 우수함을 알 수 있다.
- ② 고조파비용만을 감안시에는 HC+CC가 36,544[천원]인 Alt. 1이 가장 우수함을 알 수 있다.
- ③ 신뢰도 및 고조파비용 모두를 감안시에는 총비용 111,605[천원]인 Alt. 2가 총비용 112,870[천원]인 Alt. 1보다 우수하며, 앞의 각각을 고려하였을 경우와 다른 결과가 얻어지고 있음을 알 수 있다.

즉, 신뢰도비용 및 고조파비용을 모두 감안하여야만, 가장 경제적이면서도 합리적인 시스템의 계획을 수립할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 신뢰도와 고조파를 비용으로 처리하여 가장 경제적인 배전시스템을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 신증설예정인 배전시스템에 대해 다양한 대체안을 설정하고, 각 대체안에 대해 각각에 대한 신뢰도비용, 고조파비용, 건설비를 계산한 다음, 이들을 집계하여 가장 경제적인 대체안을 결정토록 한 것이다.

사례연구로써 현재 건설중에 있는 배전시스템에 대하여 변압기의 설치에 따른 4개의 대체안을 설정한 다음 각각의 비용을 계산한 결과, 신뢰도비용은 변압기의 수와 관계없이 부하점을 기준으로 하여 간단한 시스템 구성에서 가장 감소함을 알 수 있었다. 반면, 고조파비용은 시스템의 구성에 따라 달라지고 있음을 알 수 있었다. 이들 비용과 건설비용을 종합한 결과, 실제 건설안인 Alt. 4와 다른 Alt. 2가 가장 경제적으로 나타나고 있어, 막연히 어떤 안이 좋을 것이라는 생각과 달리 제안한 방법으로 최적의 대체안을 결정할 필요가 있음을 입증하였다.

추후, 외국에서 사용된 신뢰도단가 및 임의로 정한 고

조파단가를 사용하는 것에서 더 나아가, 우리나라의 실정에 맞는 단가에 관한 연구를 필요로 한다. 또한, 전기의 질과 관련하여 고조파만을 사용하였는데, 전기의 질에 영향을 미치는 다른 요소들에 대한 연구도 필요로 한다.

후 기

본 연구는 여수대학교 2004년도 학술연구지원비 및 산업자원부 지원에 의한 전력산업연구개발과제(R-2005-0-001)로 수행되었음.

참고문헌

1. Roy Billinton; Ronald N. Allen. "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press, 1984.
2. Arun P. Sanghvi. "Measurement and Application of Customer Interruption Cost/Value of Service for Cost-Benefit Reliability Evaluation: Some Commonly Raised Issues", IEEE Trans. on Power Systems, 1990, 5(4), 1333-1345.
3. Rong-Liang Chen; Kim Allen; Roy Billinton. "Value-Based Distribution Reliability Assessment and Planning", IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(1), 421-429.
4. YE Bin; Wang Xiu-li; BIE Zhao-hong; Wang Xi-fan. "Distribution Network Reconfiguration for Reliability Worth Enhancement", IEEE Trans., 2002, 2547-2550.
5. IEEE Industry Applications Society & Power Engineering Society: "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", IEEE Std 519-1992.
6. Phillip J. Talacek; Neville R. Watson. "Marginal Pricing of Harmonics Injections", IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(1), 50-56.
7. 이범; 김용하; 최상규; 이재걸; 연준희. "잠재가격에 의한 모선별 고조파전압제약을 고려한 고조파 저감기법에 관한 연구", 조명·전기설비학회논문지, 2003, 17(4), 87-93.
8. IEEE. "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, ANSI, 1991.