

가치평가법에 의한 배전계통계획

이범*, 김용하**, 최상규***, 이성준**, 나인규**, 임병희**
 여수대학교*, 인천대학교**, 안양과학대학***

Planning of Distribution System by Using VBDRA

B. Lee*, Y.H. Kim**, S.K. Choi***, S.J. Lee**, I.G. Na**, B.H. Yim**
 Yosu National Univ*, Univ. of Incheon**, Anyang Technical College***

Abstract - This paper presents a methodology which can make alternatives of distribution system, and can calculate reliability costs, harmonics costs, and construction costs. And by using total cost of the system, decision maker can select the most economic and reasonable alternative. As a result, not only we can decide most economical and reasonable result, but we can get proper reliability and harmonics level. The usefulness of the method is verified by applying it to the test system.

1. 서 론

배전계통의 계획은 조류계산을 통한 계통의 전압강하를 주안점으로 하여 왔으며, 신뢰도나 고조파 등을 고려하는 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다. 그러나, 이들은 각기 단위가 달라 부하점의 신뢰도나 고조파의 영향이 어느 정도인지를 계산할 수 있을 뿐이며, 이들 요소가 배전계통에 어느 정도 중요한지를 알기는 힘들었다.

배전계통의 신뢰도는 고장빈도, 고장지속시간 등으로 평가[1]하여 왔는데, 이를 비용으로 처리할 수 있는 방법인 Customer Interruption Cost(이하 CIC)[2]가 개발되어 신뢰도를 금전적으로 환산할 수 있게 되었으며, CIC를 사용하여 신뢰도를 평가할 수 있는 Value-Based Distribution Reliability Assessment(이하 VBDRA)[3]가 개발되었다. 이 방법은 부하의 종류를 구분하고, 각 부하별, 고장지속시간별로 신뢰도비용을 계산할 수 있도록 한 것이다. 또한, 부하점을 기준으로 하여 신뢰도비용을 구한 연구[4]가 진행되어 왔다.

또한, 종래에 고조파는 전력수전점을 기준으로 하여 일정한 수준을 만족시키는 방법으로 평가하여 왔다.[5] 그러나, 이들 고조파는 전력계통뿐만 아니라 배전계통의 부하에도 영향을 미치기 때문에, 배전계통의 요소별 고조파 영향의 검토가 필요하다 하겠다. 이와 같은 각 부하점별 고조파의 영향을 부(-)의 특성을 갖는 자원으로 간주하고, 고조파조류계산을 통해 비용으로 처리하려는 연구[6][7]가 있어 왔으며, 이와 같은 방법으로 고조파저감장치를 설계하는 연구[8]가 있어 왔다.

그러므로, 본 연구에서는 배전계통을 계획함에 있어 비용처리를 통한 신뢰도와 고조파의 영향을 감안한 최적의 배전계통설계를 할 수 있는 방법을 개발하였다. 이의 방법으로, 설계중인 배전계통에 대한 대체안을 구성하고, 이들 각각에 대한 신뢰도비용, 고조파비용, 건설비를 계산한 다음, 이들의 총비용을 통하여 가장 합리적인 대체안을 결정할 수 있도록 한 것이다. 이 결과, 건설비용만으로 배전계통을 결정하고 신뢰도나 고조파의 영향을 참고사항 정도로 다루는 방법에서 더 나아가, 합리적인 신뢰도수준과 고조파영향수준을 결정할 수 있게 되었다. 제안한 방법을 현재 건설 중에 있는 배전계통에 적용하여 본 논문의 유용성을 검증하였다.

2. 가치결정에 의한 배전시스템의 설계

2.1 배전시스템 평가요소의 가치

(1) 신뢰도비용

배전계통에 고장이 발생하여 전력을 공급하지 못하게 되면, 부하인 소비자는 이와 관련하여 비용이 발생하게 되며, 이를 Customer Interruption Cost(CIC)[2]로 나타낼 수 있다. CIC는 부하의 종류에 따라 달라지게 되는데, 이의 방법으로 부하를 7종류로 나누고, 시간별로 비용을 계산[4]하여 왔으며, 지금까지 연구되어온 CIC를 표 1에 나타내었다.

표 1. 부하종류별 차단비용

부 문	차 단 비 용 (\$/kW)				
	1 분	20 분	1 시간	4 시간	8 시간
대규모사용자	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
산 업 용	1.625	3.868	9.085	25.16	55.81
상 업 용	0.381	2.969	8.552	31.32	83.01
농 사 용	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120
주 택 용	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, 차단비용은 캐나다 달러임.)

이와 같이 하여 얻은 CIC로부터 신뢰도비용을 계산하기 위하여, 다음과 같은 방법[4]을 사용한다.

① 공급하지 못하는 에너지(Expected energy not supply)

$$EENS = \sum_{i=1}^N EENS_i = \sum_{i=1}^N L_i \sum_{j=1}^K r_{ij} \lambda_{ij} \quad [kW] \quad (1)$$

② 차단비용 (Expected interruption cost)

$$ECOST = \sum_{i=1}^N ECOST_i = \sum_{i=1}^N L_i \sum_{j=1}^K C_{ij} \lambda_{ij} \quad [천원] \quad (2)$$

여기서,
 λ_{ij}, r_{ij} : i모선, j요소의 고장률 및 고장지속시간[h]
 L_i : i모선에서의 평균부하[kw]
 C_{ij} : i모선, j요소의 차단비용[\$ /kw/min]
 N : 배전계통의 모선의 수
 K : 모선에 부착된 요소의 수

(2) 고조파비용[8]

각 모선에 유입되는 h차 고조파전류에 의해 유기되는 고조파전압을 금전적 가치로 평가하며, 다음과 같은 목적함수를 구성한다.

$$C(|E_h|) = \sum_{i=1}^N c_i (|E_{hi}|) [천원] \quad (3)$$

여기서,

$c_i(|E_{hi}|)$: 모선 i에서 $|E_{hi}|$ 에 의해 나타나는 고조파의 가치[천원]

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

E_{hi} : 모선 i 에서의 h차 고조파전압[PU]

h : 고조파의 차수

또한, 제약조건으로는 모선별 고조파전력방정식, PCC에서의 고조파전압제약, 각 모선에서의 고조파전압제약, 고조파저감장치제약을 고려한다.

식(3)의 목적함수와 제약조건을 사용하여 확대목적함수를 구성한 후, 모선별 고조파의 잠재가격 μ_h 를 계산하면 다음과 같다.

$$\mu_h = (K_h - \sigma_{1h}) [e^{-j\omega t}] [Z_h] \quad (4)$$

여기서,

$$K_h = \frac{\partial C(|E_h|)}{\partial |E_h|} \text{ [천원/PU]}$$

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

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

$$\sigma_{1h} = [\sigma_{1h1} \sigma_{1h2} \dots \sigma_{1hm}]$$

$[Z_h]$: h차 고조파의 Z 버스행렬

a_{hi} : 모선 i 에서의 h차 고조파전류의 전류가

μ_{hi} : 모선 i 에서의 h차 고조파의 잠재가격

k_{hi} : 모선 i 에서의 h차 고조파의 단위 전압에 의한 가치[천원/PU]

σ_{1hi} : 고조파전압과 관련된 부동호제약관련 승수

또한, 식(4)의 잠재가격을 사용하여 고조파비용을 계산하면 다음과 같다.

$$\mu_h I_h = (K_h - \sigma_{1h}) [Z_h] |I_h| \text{ [천원]} \quad (5)$$

여기서,

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

I_{hi} : 모선 i 에 유입되는 h차 고조파전류[PU]

(3) 설비건설비용

신뢰도나 고조파의 영향을 줄이기 위해서는 설비의 보강을 필요로 한다. 설비의 건설비용은 실제로 소요되는 공사비로 산정한다.

2.2 배전시스템의 신·증설 설계

배전계통을 건설하는 사람의 입장에서는 저렴한 가격에 건설하는 것이 무엇보다 중요하다 하겠다. 반면, 운영하는 사람의 입장에서는 고장이 작고, 고조파문제가 발생하지 않는 배전계통의 건설이 중요하다 할 것이다. 따라서, 신뢰도 및 고조파영향을 앞서 계산한 비용으로 처리하면 다음과 같다.

$$\text{Min 총비용} = \text{설비비용} + \text{ECOST} + \mu_h I_h \text{ [천원]} \quad (6)$$

즉, 식(6)의 총비용을 최소로 하는 계통을 계획하면, 가장 합리적인 건설이 이루어진다고 할 수 있다.

그러나, 배전시스템은 부하의 특성에 따라 구성이 다양하며, 또한 건설비용 과 신뢰도비용 및 고조파비용의 상관관계가 일정하지 않다. 따라서, 본 연구에서는 배전계통의 신·증설이 가능한 대안을 제시하고, 이들 대체안 중 식(6)을 통하여 가장 경제적인 대체안을 결정할 수 있도록 하였다.

3. 사례연구

3.1 계통자료

모델계통으로는 현재 건설 중인 계통으로 10개의 부하 모선을 갖고 있으며, 이들 부하의 크기는 표 2와 같다.

표 2 부하의 종류 및 상수

부하점	부하종류	크기[kva]	k_{hi}
부하 1	전동기부하	350	-150
부하 2	전동기부하	1100	-150
부하 3	전동기부하	1100	-150
부하 4	전동기부하	1100	-150
부하 5	조명부하	600	-200
부하 6	조명부하	600	-200
부하 7	통신기기부하	500	-700
부하 8	정밀기기부하	300	-900
부하 9	정류기부하	500	-30
부하10	정류기부하	500	-30

부하종류별 차단비용은 표 1의 값을 화폐의 단위만 변경하여 사용(1\$=800원)하였으며, 기기의 고조파 영향을 나타내는 상수 k_{hi} 는 아직까지 일반화된 값이 개발되지 않은 관계로, 부하의 특성을 감안하여 표 2와 같이 임의로 주었으며, 신뢰도자료는 옥외설비를 대상으로 한 자료[9]를, 기기의 임피던스는 전력기기회사에서 제공하는 용량별 임피던스자료를 사용하였다.

3.2 계산결과

표 2의 10개 부하모선에 전력을 공급하기 위한 공급설비로, 그림 1과 같은 4가지를 대체안을 제시하였는데, 부하 1은 밀집되어 있는 부하 2~10과 거리가 떨어져 있기 때문에 별도의 변압기를 사용하였다.

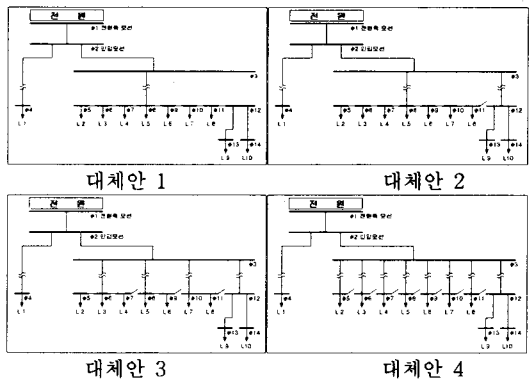


그림 1. 각 대체안별 계통도

각 대체안별 계산 결과 중 부하점의 신뢰도는 표 3에, 고조파전압은 표 4에 나타내었다.

표 3 대체안별 부하점의 신뢰도

모선	대체안 1		대체안 2		대체안 3		대체안 4	
	λ	r	λ	r	λ	r	λ	r
4	200182	33.91	200182	33.91	200182	33.91	200182	33.91
5	216491	38.81	216491	38.81	199815	38.83	191477	38.83
6	208153	38.82	208153	38.82	191477	38.83	191477	38.83
7	199815	38.83	199815	38.83	199815	38.83	191477	38.83
8	191477	38.83	191477	38.83	191477	38.83	191477	38.83
9	199815	38.83	199815	38.83	199815	38.83	191477	38.83
10	208153	38.82	208153	38.82	191477	38.83	191477	38.83
11	216491	38.81	216491	38.81	199815	38.83	191477	38.83
13	242466	39.73	209114	39.91	209114	39.91	209114	39.91
14	242466	39.73	209114	39.91	209114	39.91	209114	39.91

	대체안 1	대체안 2	대체안 3	대체안 4
SAIFI	2034390	2032010	1960010	1916572
SAIDI	7,893,4032	7,884,2065	7,606,0053	7,438,1650
CAIDI	38,7998489	38,8000372	38,8059483	38,8097293
ASAI	9990989	9991000	9991317	9991509
ASUI	0009011	0009000	0008683	0008491
ENS	54.4	53.1	51.1	50.1
AENS	9.7	9.5	9.1	8.9

표 3으로부터 하나의 대형변압기로부터 전력을 공급하는 경우보다 여러 대의 소형변압기로부터 전력을 공급하는 경우에서 고장빈도, 고장지속시간, 에너지불공급지수가 감소하며, 평균공급능력이 증가하는 등 신뢰도가 좋게 나옴을 알 수 있다. 즉, 부하점을 기준으로 할 때, 공급계통이 단순할수록 신뢰도가 좋아지기 때문에, 신뢰도를 개선하기 위해서는 변압기를 여러 대 설치하더라도 계통의 구성을 간단히 할 필요가 있음을 알 수 있다. 반면, 소용량변압기의 다수 설치 및 주변장치의 증가에 따라 비용의 증가가 수반되기 때문에, 신뢰도와 비용은 상반되는 특성을 지님을 알 수 있다.

표 4 대체안별 고조파전압

	모선	대체안 1	대체안 2	대체안 3	대체안 4
고조파전압 (%)	모선 1	0.971	0.971	0.971	0.971
	모선 2	0.977	0.977	0.977	0.977
	모선 3	0.978	0.978	0.978	0.978
	모선 4	1.081	1.081	1.081	1.081
	모선 5	0.162	0.580	0.836	1.086
	모선 6	0.158	0.576	0.970	1.087
	모선 7	0.154	0.572	0.973	1.086
	모선 8	0.867	0.773	1.096	1.094
	모선 9	0.894	0.782	1.098	1.094
	모선 10	0.943	0.794	1.233	1.187
	모선 11	0.963	0.797	1.235	1.163
	모선 12	0.963	1.434	1.434	1.434
	모선 13	0.981	1.452	1.452	1.452
	모선 14	0.981	1.452	1.452	1.452

고조파는 기본파와 달리 2~50배의 조파이므로, 유도성 리액턴스의 특성을 갖고 있는 변압기를 통과하기 힘들기 때문에 고조파발생이 많은 부하 9,10을 갖고 있는 모선 12,13,14에서 높은 고조파전압을 나타낸다. 모선 5~12를 모두 연결한 대체안 1에서 모선 12,13,14의 고조파전압이 낮게 나오는데 반하여, 모선 12를 분리한 대체안 2,3,4에서는 고조파전압이 높게 나옴을 알 수 있다. 즉, 대체안 1에서는 모선 12에서 발생한 고조파가 고조파발생이 상대적으로 작은 모선 5~11로 분산되는 반면, 대체안 2,3,4에서는 이들을 별도의 변압기로 공급하기 때문에 분산이 작고 모선 12~14에 한정되게 되어 높은 고조파전압이 유리된다. 따라서, 다른 기기에 고조파의 영향을 줄이기 위해서는 고조파 발생원을 별도의 변압기로 고립시키도록 하는 것이 유리하며, 고조파가 다른 기기에 유도되더라도 모선별 고조파영향을 줄이려면 대형변압기와 함께 2차측 모선을 연결하는 것이 유리함을 알 수 있다.

대체안별 총 비용을 계산한 결과를 표 5에 나타내었다. 여기서 건설비는 변압기, 차단기 등의 자재비와 설치인건비로 구성하였는데, 설치인건비는 자재비의 30%로 개략 계산하였으며, 기기의 수명은 단순히 10년으로 계산하였다.

표 5 대체안별 총 비용

	대체안 1	대체안 2	대체안 3	대체안 4
신뢰도비용	76,326	74,838	71,928	70,537
고조파비용	17,368	16,741	24,637	24,424
설비비용	10,547	12,212	16,450	24,045
총비용	104,241	103,791	113,015	119,006

표 5로부터 가장 우수한 대체안은 대체안 2임을 알 수 있다. 신뢰도라는 측면에서 보면 대체안 4>3>2>1로 대체안 4가 가장 우수하다 할 수 있으며, 고조파라는 측면에서 보면 대체안 2>1>4>3으로 대체안 2가 가장 우수함을 알 수 있다. 오히려 신뢰도가 우수한 대체안 3,4의 경우는 고조파의 영향은 상당히 나쁘게 나타나고 있다.

여기서, 고조파발생원이자 k_{hi} 가 작은 부하 9,10을 고립시킨 대체안 2가 고조파를 다른 모선에 분산시킨 대체안 1보다 고조파비용이 작음을 알 수 있다. 반면, 설비비용은 대체안 1>2>3>4로 대체안 1이 가장 우수함을 나타내고 있다. 이를 종합하였을 때, 신뢰도비용만을 감안시에는 총비용 86,873[천원]인 대체안 1이 총비용 87,050[천원]인 대체안 2보다 우수함을 알 수 있으며, 고조파비용만을 감안시에는 총비용 27,915[천원]인 대체안 1이 총비용 28,953[천원]인 대체안 2보다 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

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

사해연구로써 현재 건설 중에 있는 배전계통에 대하여 변압기의 설치에 따른 4개의 대체안을 설정한 다음 각각의 비용을 계산한 결과, 신뢰도비용은 변압기의 수와 관계없이 부하점을 기준으로 하여 간단한 계통구성에서 가장 감소함을 알 수 있었다. 반면, 고조파비용은 부하별 고조파 발생원과 고조파 반응정도에 따라 달라지고 있음을 알 수 있었다. 이들 비용과 건설비용을 종합한 결과, 실제 건설인인 대체안 4와 다른 대체안 2가 가장 경제적으로 나타나고 있어, 막연히 어떤 안이 좋을 것이라는 생각과 달리 제안한 방법으로 최적의 대체안을 결정할 필요가 있음을 입증하였다.

감사의 글

"본 연구는 한국과학기술원 지정 인천대학교 동북아전자물류 연구센터의 지원으로 수행되었음"

[참 고 문 헌]

- [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, Vol.5, No.4, Nov. 1990, pp.1333-1345
- [3] Rong-Liang Chen, Kim Allen, Roy Billinton, "Value-Based Distribution Reliability Assessment and Planning", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.1, Jan. 1995, pp.421-429
- [4] YE Bin, Wang Xiu-li, BIE Zhao-hong, Wang Xi-fan, "Distribution Network Reconfiguration for Reliability Worth Enhancement", IEEE Trans. 2002, pp.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. Talack, Neville R. Watson, "Marginal Pricing of Harmonics Injections", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.17, No.1, Feb. 2002, pp.50-56
- [7] Phillip J. Talack, Neville R. Watson, "Marginal Pricing of Harmonics Injections: An Analysis of the Resulting Payments", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.17, No.3, Aug. 2002, pp.640-645
- [8] 이범, 김용하, 최상규, 이재걸, 연준희, "잠재가격에 의한 모선별 고조파전압제약을 고려한 고조파 저감기법에 관한 연구", 조명.전기설비학회논문지, 17권, 4호, 한국조명.전기설비학회, 2003. 7., pp.87-93
- [9] IEEE, "IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems", IEEE, ANSI, 1991.