

가치평가법에 의한 배전계통의 신뢰도 평가

김용하\*, 이범\*\*, 최상규\*\*\*, 임병희\*\*\*\*, 이성준\*, 박남철\*\*\*\*\*, 손승기\*  
 인천대학교\*, 여수대학교\*\*, 안양과학대학\*\*\*, 한국전기안전공사\*\*\*\*, 인천직업전문학교\*\*\*\*\*

Electric Distribution System Evaluation by Value-based Reliability Analysis

Kim Y.H\*, Lee Buhm\*\*, Choi S.K\*\*\*, Im B.H\*\*\*\*, Lee S.J\*, Park N.C\*\*\*\*\*, SON S.K\*  
 Incheon Univ.\*, Yeosoo Univ.\*\*, Anyang Univ.\*\*\*, Kesco\*\*\*\*, Vt-Incheon\*\*\*\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 신뢰도와 고조파를 동시에 고려하여 배전계통을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 우선, VBDRA를 사용하여 신뢰도를 비용으로 처리할 수 있도록 하였으며, 고조파의 영향을 비용으로 처리할 수 있도록 함으로써, 두가지 요소사이에서 발생하는 단위문제를 해결하였다. 또한 배전계통의 다양한 대체안을 구성하고, 이들 각각에 대한 신뢰도비용, 고조파비용, 신증설비용을 계산한 다음, 이들의 총비용을 통하여 가장 합리적인 대체안을 결정할 수 있도록 하였다.

1. 서 론

배전계통을 계획하는 방법으로는, 지금까지는 조류계산을 통한 계통의 전압강하를 주안점으로 하여 왔으며, 현재 신뢰도나 전력의 품질을 감안하는 방법에 대한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 이들 요소의 단위가 각각 달라 부하점의 신뢰도나 고조파의 영향이 어느 정도인지를 계산할 수 있을 뿐이며, 이들 요소가 배전계통에 어느 정도 중요한지를 알기는 힘들었다.

종래에 배전계통의 신뢰도는 고정빈도나 고장지속시간 등으로 평가하여 왔는데, 이를 비용으로 처리할 수 있는 방법인 Customer Interruption Cost(CIC)가 연구되었으며, CIC를 사용하여 신뢰도를 비용으로 가치를 평가할 수 있는 방법인 Value-Based Distribution Reliability Assessment(VBDRA)가 개발되었다. 이 방법은 부하를 여러 종류로 구분하고, 부하의 종류별로 정전시간에 따라 정전시간별 정전비용을 계산할 수 있도록 한 것이다. 또한, 전체 신뢰도비용을 계산할 수 있도록 하고, 실제 계통에 대해 부하 및 고장지속시간별로 CIC를 구한 연구가 진행되었다.

본 논문에서는 신뢰도와 고조파를 동시에 고려하여 배전계통을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 우선, VBDRA를 사용하여 신뢰도를 비용으로 처리할 수 있도록 하였으며 이와 시에 고조파의 영향을 비용으로 처리할 수 있도록 함으로써, 두 가지 요소사이에서 발생하는 단위문제를 해결하였다. 또한, 배전계통의 다양한 대체안을 구성하고, 이들 각각에 대한 신뢰도비용, 고조파비용, 신증설비용을 계산한 다음, 이들의 총비용을 통하여 가장 합리적인 대체안을 결정할 수 있도록 하였다.

2. 본 론

2.1 신뢰도의 가치평가

정전을 비용으로 처리하는 CIC, CIC를 고장상황에 맞는 함수로 나타내는 SCDF, SCDF를 활용하여 정전때 따른 총비용을 산정하는 VBDRA등으로 구분할 수 있다. 이러한 과정을 통해 계통에 발생하는 정전을 비용으로 표시할 수 있다.

2.1.1 CIC(Customer Interruption Cost)

CIC는 배전계통에 고장이 발생하여 전력을 공급하지 못하게 됨으로서 이와 관련하여 발생하는 정전비용을 말한다. CIC와 관련된 비용으로는 공급차단직후로 소비자가 각종손상을 방지하기 위한 조치를 필요로 하기 때문에 발생하는 비용과 고장 중으로 생산, 판매, 사무, 일, 유통 등을 할 수 없어 발생하는 비용 및 고장 복구 후로 정상적인 생산, 일, 생활로 돌아가는데 필요로 하는 비용 등이 있다.

CIC 추정방법은 거시적인 방법과 미시적인 방법 두 가지가 있는데 전자의 경우는 국가의 GNP, GDP등을 활용하여 CIC를 추정하기에 정확한 반영이 힘들지만 후자의 경우 수용가를 대상으로 한 설문조사를 통해서 추정하기 때문에 수용가의 특성을 반영한 비교적 정확한 CIC를 추정할 수 있다.

2.1.2 SCDF(Sector Customer Damage Function)

SCDF는 CIC를 함수로 표현한 것이라 할 수 있다. 다만, CIC는 하나의 함수로 표현하기 힘들기 때문에 한 축으로는 부하의 종류로, 다른 축으로는 고장지속시간으로 소비자 피해비용을 나타낸 것이다. CIC 및 SCDF는 부하의 종류 및 고장지속시간 뿐만 아니라, 부하가 속한 국가, 지역, 날씨, 시간대에 따라 매우 상이하게 나타내기 때문에, 이와 같은 상황을 다른 한 축으로 표시한 3차원형태의 이산형 함수로 나타낼 수 있다.

표 1 부하종류별 SCDF

부 분	정 전 비 용 (\$/kW)				
	1분	20분	1시간	4시간	8시간
대규모부하	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

### 2.1.3 VBDRA(Value-Based Distribution Reliability Assessment)

고장이 발생하였을 때, SCDF를 사용하여 가치를 기반으로 하는 신뢰도 평가방법을 VBDRA라고 한다. VBDRA는 부하의 종류 및 상황과 함께 고장발생을 및 지속시간을 SCDF함수를 통해 예상에너지불공급(Expected energy not supply, 이하 EENS), 예상정전비용(Expected interruption cost, 이하 ECOST), 차단에너지비용(Interrupted energy accessment rate, 이하 IEAR)를 계산하고, 이 값을 가치로서 평가하는 것이다.

#### 1) EENS

$$EE = \sum_{i=1}^N L_i \sum_{j=1}^K r_{ij} \lambda_{ij} \quad [\text{kWh/yr}] \quad (1)$$

#### 2) ECOST

$$EC = \sum_{i=1}^N L_i \sum_{j=1}^K C_{ij} \lambda_{ij} \quad [\text{천원/yr}] \quad (2)$$

#### 3) IEAR

$$IEAR = \frac{EC}{EE} \quad (3)$$

여기서,

- $L_i$ :  $i$ 모선에서의 평균부하[kW]
- $C_{ij} = f(r_{ij})$ :  $r_{ij}$ 에의해 발생하는 CIC
- $\lambda_{ij}$ :  $i$ 모선,  $j$ 요소의 고장율
- $r_{ij}$ :  $i$ 모선,  $j$ 요소의 고장지속시간[h]
- $N$ : 배전시스템의 모선의 수 ( $i=1..N$ )
- $K$ : 모선에 부착된 요소의 수 ( $j=1..K$ )

## 2.2 고조파의 가치평가

계통에서 발생하는 고조파는 일반적으로 2-50차까지 고려하도록 규정되어 있으며, 따라서 각 조파별로 문제점을 검토할 필요가 있다. 그러므로, 본 논문에서는 각 조파별로 목적함수와 제약조건을 구성하여 최적화문제를 구성하였다.

### 2.2.1 목적함수 및 제약조건

#### 1. 목적함수

우선, 각 모선에 유입되는  $h$ 차 고조파전류에 의해 유입되는 고조파전압을 금전적 가치로 평가하기 위하여 각 모선에서 유입되는 고조파전압을 가치로 변환하는 함수를 다음과 같이 구성하였다. 식 (4)의 고조파는 부(-)의 특성을 갖는 자원이므로, 이 값을 최대화하면 고조파의 영향이 최소가 되게 된다.

$$\text{Max } C(|E_h|) = \sum_{i=1}^n c_i (|E_{hi}|) \quad [\text{천원}] \quad (4)$$

여기서,

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

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

$E_{hi}$ : 모선  $i$ 에서의  $h$ 차 고조파전압[PU]

$h$ : 고조파의 차수 ( $h=1..H$ )

$n$ : 모선의 수

#### 2. 제약조건

제약조건 중, 동호제약으로는 고조파전력방정식을, 부

동호제약으로는 PCC 및 각 모선에서의 고조파전압제약을 고려한다. 이의 방법으로 각 모선의 고조파전압제약을 위반하면 고조파의 가치를 (- $\infty$ )로 처리한다.

[ 모선별 고조파 전력방정식

배전시스템의 모선에 유입되는  $h$ 차 고조파전류는 고조파저감장치에 의해 저감되고 난 후, 다음과 같이 고조파전압이 유기된다.

$$E_h = [Z_h](I_h - I_{Rh}) \\ = [Y_h]^{-1}(I_h - I_{Rh}) \quad (5)$$

여기서,

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

$I_{hi}$ : 모선  $i$ 에 유입되는  $h$ 차 고조파전류[PU]

$[Z_h]$ :  $h$ 차 고조파의 Z 버스행렬

$[Y_h]$ :  $h$ 차 고조파의 Y 버스 행렬

‡ PCC에서의 고조파전압제약

전기를 공급하는 회사는 수용가의 PCC에서의 고조파를 일정한 기준 이내로 유지할 것을 요구하고 있기 때문에, 이에 맞도록 운전해야 한다.

$$|E_{hPCC}| \leq |E_{hPCC}^{\text{max}}| \quad (6)$$

여기서,

$$|E_{hPCC}^{\text{max}}|: \text{PCC에서의 } h\text{차 고조파전압의 허용치[PU]}$$

‡ 각 모선에서의 고조파전압제약

배전시스템의 모선에는 다양한 기기들이 설치되어 있으며, 이들 기기별로 고조파전압에의 영향이 달리 나타난다. 따라서, 각 모선별로 일정한 고조파전압 이내로 운전해야 한다.

$$|E_{hi}| \leq |E_{hi}^{\text{max}}| \quad (7)$$

여기서,

$$|E_{hi}^{\text{max}}| = [|E_{hi1}^{\text{max}}| |E_{hi2}^{\text{max}}| \dots |E_{him}^{\text{max}}|]^T$$

$|E_{hi}^{\text{max}}|$ : 모선  $i$ 에서의  $h$ 차 고조파전압의 허용치[PU]

여기서, PCC는 배전시스템의 모선들중 하나이기 때문에, 식 (6)는 식(6)에 포함될 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 식 (7)의  $n$ 개의 모선중 PCC에 해당하는 모선에  $|E_{hPCC}^{\text{max}}|$ 를 대입하여 사용토록 하였다.

### 2.2.2 최적화문제의 구성 및 해법

#### 1. 확대목적함수의 구성

앞서 구성된 2.2.1절에서의 목적함수와 제약조건으로 최적화문제를 풀기 위하여 다음과 같이 확대목적함수를 구성하였다.

$$L(|E_h, \mu_h, \sigma_h) = C(|E_h|) \\ + \mu_h(I_h - [Y_h] E_h) + \sigma_h(|E_h^{\text{max}}| - |E_h|) \quad [\text{천원}] \quad (8)$$

여기서,

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

$\mu_{hi}$ : 모선  $i$ 에서의  $h$ 차 고조파의 잠재가치

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

$\sigma_{hi}$ : 부동호제약관련 승수

## 2. 잠재가격

확대목적함수의 구성에서의 식 (8)로부터 잠재가격  $\mu_h$ 를 구하면 다음과 같다. 발생된 고조파에 의한 각 모선의  $\mu_h$ 를 구하기 위하여  $|E_h|$ 에 대하여 편미분하였다.

$$\frac{\partial L}{\partial E_h} = \frac{\partial C(|E_h|)}{\partial |E_h|} - \mu_h [Y_h] \frac{\partial E_h}{\partial |E_h|} - \sigma_h = 0 \quad (9)$$

식 (9)로부터  $\mu_h$ 를 구함에 있어 유기된 고조파전압에 따른 가치를 간략하게 계산하기 위하여 다음과 같이  $K_h$ 를 정의하고, 각 모선별로 연결된 실제부하의 피해정도를 미리 산정하여 사용토록 하였다.

$$\mu_h I_h = K_h |E_h| = K_h [Z_h] I_h \quad (10)$$

$$K_h = [k_{h1} k_{h2} \dots k_{hm}] \quad (11)$$

$$K_h = \frac{\partial C(|E_h|)}{\partial |E_h|} \quad (12)$$

여기서,

$k_{hi}$  : 모선 i에서의 h차 고조파의 단위 전압왜곡에 의한 한계가치 [천원/PU]

식 (10) ~ 식 (12)로부터 고조파비용을 계산하면 다음과 같다.

$$HC = \mu_h I_h \times 24 \times 365 \text{ [천원/yr]} \quad (13)$$

## 2.3 설비비용평가

신뢰도비용이나 고조파비용을 줄이기 위해서는 설비의 보강을 필요로 하며, 설비비용이 수반된다. 설비비용은 설비신증설비용을 설비의 수명으로 나누어 1년간의 설비비용으로 계산한다.

### 1. 설비신증설비용

설비의 신증설비용으로는 설비의 신증설에 따른 재료비, 인건비, 제경비등 직접비용이 소요되며, 이들 설비를 운영함에 따른 비용이 포함된다. 만약, 설비신증설에 따른 직접비용이 증가하더라도, 운영비용이 이보다 많이 절감되면 실제의 설비신증설비용은 감소한다.

### 2. 설비의 수명

모든 설비의 수명은 유한하다. 따라서, 투자된 설비신증설비용은 한번 투자하면 영구한 것이 아닌, 정상적인 수명까지만 사용할 수 있다. 설비가 노후하게 되면 운영비용이 급증하기 때문에 경제적인 수명을 사용하게 되는데, 개략 10~20년 정도를 설비의 수명으로 간주한다. 이와 같이 하여 산출된 설비신증설비용과 설비의 수명을 사용하여 식 (14)와 같은 설비비용을 산출한다.

$$CC = \frac{\text{설비신증설비용}}{\text{설비의수명}} \text{ [천원/yr]} \quad (14)$$

## 2.4 배전계통의 총 가치

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, 이들을 모두를 비용으로 처리하여 집계함으로써 식 (15)와 같이 총 가치를 계산하였다.

$$TC = EC + HC + CC \text{ [천원/yr]} \quad (15)$$

즉, 식 (15)의 총비용을 최소로 하는 계통을 계획하면, 가장 합리적인 건설이 이루어진다고 할 수 있다.

## 3. 결 론

본 연구에서는 신뢰도와 고조파를 비용으로 처리하여 가장 경제적인 배전계통을 계획할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 신증설예정인 배전계통에 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 배전계통에 대하여 변압기의 설치에 따른 4개의 대체안을 설정한 다음 각각의 비용을 계산한 결과, 신뢰도비용은 변압기의 수와 관계없이 부하점용 기준으로 하여 간단한 계통구성에서 가장 감소함을 알 수 있었다. 반면, 고조파비용은 계통의 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 고조파단가를 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.

### 감사의 글

“본 연구는 2005년도 산업자원부 전력산업 기반조성사업실의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.”

### [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, pp.1333-1345, (1990)
- [3] Rong-Liang Chen, Kim Allen, Roy Billinton: "Value-Based Distribution Reliability Assessment and Planning", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.10, No.1, pp.421-429, (1995)
- [4] YE Bin, Wang Xiu-li, BIE Zhao-hong: Wang Xi-fan, "Distribution Network Reconfiguration for Reliability Worth Enhancement", IEEE Trans., pp.2547-2550, (2002)
- [5] IEEE Industry Applications Society & Power Engineering Society: "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", IEEE Std 519-1992