

배전시스템 전기설비 구성에 따른 확률론적 전력품질의 정량적 평가기법 개발

(The Development of Probabilistic Power Quality Evaluation Method for Electrical Distribution System)

김용하* · 이성준 · 우성민 · 임현성 · 손승기 · 구민서

(Yong-Ha Kim · Sung-Jun Lee · Sung-Min Woo · Hyun-Sung Lim · Seung-Ki Son · Min-Seo Ku)

요 약

본 연구에서는 배전시스템 안정성의 요소라 할 수 있는 고조파, 전압변동, Sag/Swell, 신뢰도의 측면에서 배전시스템을 전력품질 측면에서 안정성을 종합적으로 평가하는 방법을 개발하였다. 시스템이 전력품질의 측면에서 얼마나 안정적인가를 정량적으로 평가하기 위해서 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 사용하여 종합 전력품질 통합 지수를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 수행함으로써 사고를 고려한 배전시스템의 안정성을 평가하였다.

Abstract

This paper presents a methodology on the AHP(Analytic Hierarchy Process) to calculate unified power quality index which provide an overall assessment of the distribution system performance. To obtain the unified power quality index, we propose the use of the AHP model and consider contingency using Monte Carlo simulation. The proposed method is especially useful and effective for planning. We have applied the proposed method to an actual relatively large system.

Key Words : Reliability, Voltage sag/swell, Voltage drops, Harmonics, Analytic Hierarchy Process, Monte Carlo simulation, Unified power quality index

1. 서 론

최근 우리나라의 산업경쟁력이 주변국가에 비해

점차 낮아지고 있는 상황에서 상품의 고품질화는 매우 중요하다 할 수 있다. 이에 영향을 미치는 중요한 요소 중의 하나는 수용가에 공급되는 전력품질이라 할 수 있으며, 배전시스템은 전력을 사용하는 기기에 직접적인 영향을 미치기 때문에 실제로 배전시스템에서의 전력품질은 매우 중요하다. 지금까지 전력품질의 문제는 전력을 공급하는 공급자의 문제로 정전압과 정주파수를 유지하는 등의 문제로만 인식되

* 주저자 : 인천대학교 전기공학과 교수
Tel : 032-770-8434, Fax : 032-766-8434
E-mail : yhkim@incheon.ac.kr
접수일자 : 2007년 1월 23일
1차심사 : 2007년 1월 29일, 2차심사 : 2007년 6월 1일
심사완료 : 2007년 6월 14일

어 왔으나 산업기기가 정밀화되면서 수용가에서 발생하는 전력품질의 문제는 더 이상 전력 공급만의 문제가 아닌 전력의 공급과 사용에 걸친 전반적인 문제로 취급되게 되었다. 그러므로 현재 배전시스템의 전력품질을 고조파, 전압변동, Sag/Swell, 신뢰도의 측면에서 개별적으로 평가하는 연구가 진행되고 있다. 즉 배전시스템을 대상으로 하여 신뢰도 및 전압품질의 측면에서 개개 항목에 대한 평가는 이루어고 있으나 이들을 종합적으로 정량화하여 평가할 수 있는 방법에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 배전시스템을 신설하거나 확충하는 경우에 설계된 시스템이 얼마나 시스템 구성 측면에서 신뢰성을 가질 수 있으며 전력품질의 측면에서 안정적인가를 종합화된 정량화지수로 판단할 필요가 있다.

본 연구에서는 배전시스템의 평가를 위해서 배전시스템의 평가요소인 고조파, 전압변동, Sag/Swell, 신뢰도를 각 모선에 대하여 개별적으로 계산하고, 배전시스템이 신뢰도 및 전력품질의 측면에서 어느 정도 안정적인지를 정량적으로 산정하기 위해서 AHP(Analytic Hierarchy Process)를 이용하여 평가요소별로 그리고 시스템의 종합적인 평가지수를 산정할 수 있는 알고리즘을 제안하여 종합 전력품질 통합지수를 산정할 수 있는 방법론을 개발하였다. 따라서 배전시스템의 신설 및 증설시 구상될 수 있는 여러 대체안중에서 전력품질의 측면에서 가장 우수한 안을 선택할 수 있도록 하였으며 여러 대체안을 상대적인 정량화된 지수로서 평가할 수 있게 되어 의사결정자에게 다양한 전력품질의 측면에서 유용한 정보를 제공할 수 있게 되었다. 또한 실제 시스템에 사고가 발생하였을 경우에 사고가 배전시스템의 전력품질의 측면에서 어떤 영향을 미치는지를 판단하기 위하여 Monte Carlo Simulation을 수행하여 전력품질을 평가하였으며 이를 실제 배전계통에 적용하여 제안한 방법의 유용성을 검증하였다.

2. 통합 전력품질평가

전력품질지수에서 시스템을 기반으로 한 지수는 신뢰도 및 전압sag/swell등이 있으며 IEEE Std 1366과 IEEE Std P1564를 사용하여 지수를 산정할 수 있다. 이와 다르게 전압변동은 지수가 없으며, 고

조파는 IEEE Std 519를 이용하여 시스템의 모선마다 고조파지수를 산정할 수 있다. 이러한 차이점으로 인하여 시스템을 기반으로 한 지수를 산정할 수 없기에 본 연구에서는 AHP를 기반으로 모델을 개발하여 이들을 종합적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하였다[5]. 즉 시스템을 기반으로 한 지수를 얻기 위해서 전압변동과 고조파는 AHP를 이용하여 시스템지수를 산정하였다. 또한 전술한 전력품질지수는 그 특성이 서로 상이하며 척도(Scale)가 다르므로 본 연구에서는 해당전력품질지수가 가장 양호하게 산정될 수 있는 안 값을 Best, 최악으로 산정될 수 있는 안 값을 Worst로 하고 실제로 계산된 값을 Real로 하여 Best와 Worst값 사이에서 균준화하였다. 이와같이 균준화(Normalize)된 지수로 도출함으로써 개개특성을 동일한 척도로 평가할 수 있도록 하였다. 상기의 과정으로 산정된 신뢰도지수, 전압 sag/swell지수, 전압변동지수, 고조파지수의 종합적인 평가하기 위해서 AHP를 이용하여 종합 전력품질 통합지수를 산정하였다.

2.1 제안한 AHP 모델

2.1.1 State 구성

본 연구에서는 AHP모델을 [Best], [Real], [Worst] 3가지 상태로 구성하였다. [Best]는 시스템에서의 최적상태를 의미하며, [Real]은 시스템을 계산한 상태, [Worst]는 사용자에게 의해 시스템이 최악의 상태인 경우이다. 한 예로써 시스템의 부하점에서 표준전압이 220[V]인 경우 전압의 유지범위는 +13[V]이내이다. 이때 부하점에서 측정된 전압이 225[V]였으면, Best는 220[V], Real은 225[V], Worst는 233[V]라 할 수 있다. 또한 표준전압이 110[V]인 경우와 380[V]인 경우가 존재할 경우 220[V]와 비교해보면 값에 대한 상이함이 존재하므로 이를 해결하기 위해서 [Worst : 0]-[Real : Normalized Value]-[Best : 1]로 균준화(Normalize)하여 동일한 상태에서 평가할 수 있도록 하였다.

2.1.2 일대일비교행렬 구성

제안한 AHP에 대한 일대일비교행렬의 구성은 부

배전시스템 전기설비 구성에 따른 확률론적 전력품질의 정량적 평가기법 개발

하점, 개별 전력 품질지수, 항목별 전력 품질지수 3 가지 단계로 분류하였다. 부하점은 정밀부하와 같이 작은 변화에도 피해가 크게 발생하는 부하에는 큰 Weighting을 적용하였으며, 전열설비와 같이 큰 변화에도 피해가 크게 발생하지 않는 부하에는 작은 Weighting을 주었다. 개별 전력 품질지수는 각각의 지수의 중요성에 따라서 지수를 일대일비교행렬을 구성하였고, 항목별 전력 품질지수는 각각의 고조파, 전압변동, 전압Sag/Swell, 신뢰도 지수가 주어진 계통에 대해서 가장 민감한 지수에 따라서 Weighting을 구성하였다.

2.2 계산절차

배전시스템의 신뢰도 및 전력품질의 종합적인 정량적 평가를 위한 계산절차는 크게 4단계로 산정하였으며 이는 그림 1과 같다.

단계 1 : 적용할 대채안(alternatives)의 부하점에 대해서 고조파, 전압변동, 전압Sag/Swell, 신뢰도로써 부하점의 전력 품질을 계산한다.

단계 2 : 계산된 각각의 부하점에 대한 측정값을 하나의 부하점에 대한 평가인 개별 전력 품질지수로 나타내기 위해서 신뢰도와 전압Sag/Sewll은 지수로써 평가하였다. 전압변동 및 고조파는 부하점을 일대비교 행렬로 구성하여 AHP의 수렴화 과정에 의한 부하점에 대해서 Eigen-Value를 구함으로써 부하점을 하나의 값으로 도출하였다. 또한 산정된 개별 전력 품질지수에 대한 부하점의 결과는 그 특성이 상이하고, 계통운영시의 느껴지는 정도가 다르다. 이를 해결하기 위해서 주어진 계통에 대해서 다시 부하점의 Best, Worst에 대한 개별 전력 품질지수를 결과를 도출하여 개별 전력 품질지수를 Best와 Worst에 대해서 표준화 하였다.

단계 3 : 단계 3에서 산정된 개별 전력 품질지수를 항목별 전력 품질지수로 나타내기 위해서 개별 전력 품질지수를 일대일비교행렬을 구성하여 AHP의 수렴화 과정의해 개별 전력 품질지수를 하나의 항목별 전력 품질지수의 값으로 계산하였다.

단계 4 : 항목별 전력 품질지수를 종합전력 품질 통합지수로 산정하기 위해서 항목별 전력 품질지수

를 일대일비교행렬을 구성하여 AHP의 수렴화 과정의해 항목별 전력 품질지수를 종합전력 품질 통합지수로 표현하였다.

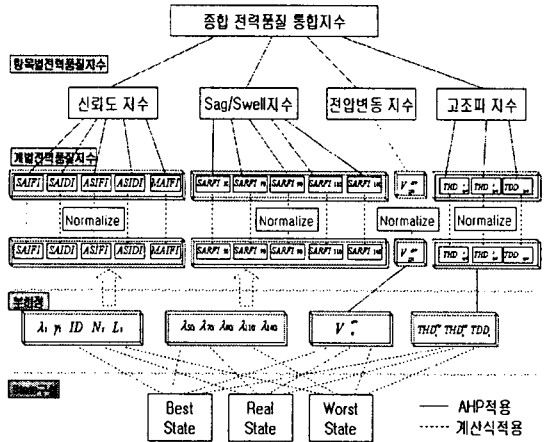


그림 1. 제안한 방법의 흐름도
Fig. 1. Flow chart of the proposed method

2.3 부하점에서의 전력품질평가

배전계통시스템의 부하점에서의 신뢰도, 전압Sag, 전압변동, 고조파는 2.3.1~2.3.4절과 같이 계산하였다.

2.3.1 신뢰도계산

신뢰도에서는 i 부하점의 정전 시 정전 수용가의 수[개] (N_i)와 차단된 부하크기[kVA] (L_i)와 이에 따른 연간평균고장빈도[회/년] (λ_i) 및 고장지속시간[시간] (r_i)등을 계산할 수 있다. 이에 주어진 계통에 대해서 계통축약 방법(Network Reduction Method)과 고장모드-효과분석법(Failure Modes and Effects Analysis)을 적용하여 λ_i 및 r_i 를 계산하였다. 또한 N_i 와 L_i 는 측정해야 하나[1], 이는 불가능하다. 이에 식 (1)과 같은 확률모델[6]을 적용하여 N_i 및 L_i 를 처리하였다.

$$N_i = \lambda_i N_{Ti}$$

$$L_i = \lambda_i L_{Ti} \tag{1}$$

단, N_{Ti} : i 부하점의 개별 수용가의 수[개]
 L_{Ti} : i 부하점의 개별 수용가의 부하[kVA]

2.3.2 전압 Sag/Swell계산

전압 Sag/Swell은 순간적으로 발생하는 전압강하나 전압상승분을 나타낸다[2]. IEEE Std 1159에 의하면 전압 Sag/Swell은 표 1과 같이 구분할 수 있다.

표 1. 전압 Sag/Swell의 발생시간
 Table 1. Occurrence time of voltage sag/swell

| 구분 | 범위 |
|----------------------------------|----------------------|
| λ_{xi}^I (Instantaneous) | 0.5[Cycle]~30[Cycle] |
| λ_{xi}^M (Momentary) | 30[Cycle]~3[Sec] |
| λ_{xi}^T (Temporary) | 3[Sec]~1[Min] |

표 1과 같이 각각의 event로 표현할 경우 매우 복잡하다. 따라서 식 (2)와 같이 발생빈도로 처리하였다.

$$\lambda_{xi} = \lambda_{xi}^I + \lambda_{xi}^M + \lambda_{xi}^T \quad (2)$$

단, x : Sag/Swell 발생크기[%] ($x=50, 70, 90, 110, 140$)

2.3.3 전압변동계산

전압변동은 조류계산을 통하여 식 3과 같이 i 부하점에 대한 전압편차 (V_i^{err})를 계산하였다[3].

$$V_i^{err} = |V_i - 1| \quad (3)$$

단, V_i : 부하점 i 의 실제전압 [PU]

2.3.4 전압변동계산

고조파스펙트럼 및 지수는 고조파조류계산을 통하여 식 4와 같이 i 부하점의 $THD^{V(orI)}$ (Total Harmonic Distortion), TDD (Total Demand Distortion)를 계산하였다[4, 8-9].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2(orI_k^2)}}{V_1(orI_1)}, \quad TDD = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_{1PEAK}} \quad (4)$$

김용하 · 이성준 · 우성민 · 임현성 · 손승기 · 구민서

단, V_1 (or I_1) : 기본파 고조파의 전압치(or 전류치)

V_h (or I_h) : h 차 고조파의 전압치(or 전류치)

I_{1PEAK} : 기본파의 정격최대전류

2.4 개별 전력 품질지수

개별 전력 품질지수를 산정하기 위해서 신뢰도 및 전압 sag지수는 IEEE Std 1366과 IEEE Std P1564를 이용하였고, 전압변동과 고조파지수는 AHP model을 적용하였다. 또한 3가지 상태([Best] - [Real] - [Worst])에 대해서 개별 전력 품질지수를 각각 계산하여 이들 사이를 균준화를 통해서 동일한 상태로 평가할 수 있는 지수로 도출하였다.

2.4.1 신뢰도 및 전압Sag/Swell지수

개별 전력 품질에서의 신뢰도지수는 식 (5)와 같이 2.3.1절의 계산된 부하점의 결과를 이용하여 IEEE Std 1366에 근거 SAIFI, SAIDI, ASIFI, ASIDI, MAIFI등의 5개 지수를 계산하였다. 전압 Sag/Swell지수는 2.3.2절의 부하점의 결과를 이용하여 IEEE P1564에 근거 SARFI_x ($x = 50, 70, 90, 110, 140$ [%])지수를 산정하였다.

$$\begin{aligned} SAIFI &= \frac{\sum N_i}{\sum N_{Ti}}, \quad SAIDI = \frac{\sum r_i N_i}{\sum N_{Ti}} \\ ASIFI &= \frac{\sum L_i}{\sum L_{Ti}}, \quad ASIDI = \frac{\sum r_i L_i}{\sum L_{Ti}} \\ MAIFI &= \frac{\sum ID_i N_i}{\sum N_{Ti}}, \quad SARFI_x = \frac{\sum \lambda_{xi} N_T}{\sum N_{Ti}} \quad (5) \end{aligned}$$

단, SAIFI : System Average Interruption Frequency Index

SAIDI : System Average Interruption Duration Index

ASIFI : Average System Interruption Frequency Index

- ASIDI : Average System Interruption Duration Index
- MAIFI : Momentary Average Interruption Frequency Index
- SARFI : System Average RMS variation Frequency Index
- ID_i : 지속정전발생시 순간정전 횟수[개]

2.4.2 전압변동 및 고조파지수

개별 전력 품질에서의 전압변동지수 및 고조파지수는 2.3.3절 및 2.3.4절의 부하점에서의 결과인 전압편차 와 THD, TDD를 2.1.2절에서 제안한 부하점의 일대일비교행렬을 구성하였고, AHP 모델을 이용하여 개별 전력 품질지수를 그림 2와 같이 구성하였다.

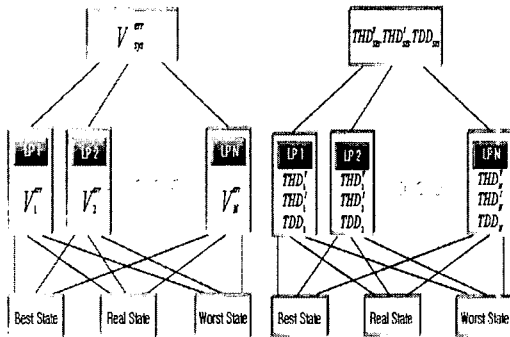


그림 2. 부하점의 AHP 모델
Fig. 2. AHP model of load point

2.4.3 개별 전력 품질지수의 표준화

2.4.1절과 2.4.2절에서 계산된 지수의 결과는 [Real] 상태이다. 따라서 [Best] 및 [Worst] 상태의 전력품질지수를 계산해야 한다. 이에 본 논문에서는 신뢰도지수인 SAIFI, ASIFI의 [Worst : 1]는 전력공급이 되지 않는 상태, [Best : 0]는 고장이 발생하지 않는 상태로 하였다. SAIDI, ASIDI의 [Worst : 50]는 전력공급이 되지 않는 상태를 8760이 될 수 있으나 체감적인 최악의 치수를 적용하였고, [Best : 0]는 고장이 발생하지 않는 상태로 정의하였다. MAIFI는 차단기의 재폐로횟수를 감안하여 [Worst : 3], [Best : 0]을 적용하였다. 전압 Sag/Swell 지수인 SARFI의

[Worst : 100]는 상시 전압 Sag/Swell이 발생하는 상태, [Best : 0]는 전압 Sag/Swell이 발생하지 않는 상태의 값으로 하였다. 전압변동지수인 [Worst : 100]은 부하점에서 전압강하분이 100[%]발생하는 상태, [Best : 0]는 전압강하분이 없는 상태의 값으로 하였다. 고조파지수는 [Worst : 100]는 부하점에서 고조파지수가 100[%]발생하는 상태, [Best : 0]는 고조파지수가 없는 상태의 값으로 하였다. 이러한 계산된 [Real]상태의 결과는 [Worst], [Best]상태의 값 사이에 존재하므로 어느 정도에 위치에 있는지 판단이 가능하다. 그러나 각각의 지수마다 그 체감의 정도가 다르다. 이를 평가하기위해서 [Real]상태의 값을 [Worst : 0]과 [Best : 1] 사이의 값으로 표준화 하였다. 또한 0과 1사이의 값의 표현으로 각각의 지수마다 중요도가 같은 레벨을 갖게 되므로 상대적 중요도를 평가하기위해서 Weighting을 주었다.

2.5 항목별 전력 품질지수

2.4절에서 산정된 개별 전력 품질지수를 항목별 전력 품질지수로 나타내기 위해서 2.1절에서 제안한 AHP 모델을 이용하여 항목별 전력 품질지수를 그림 3과 같이 구성하였다.

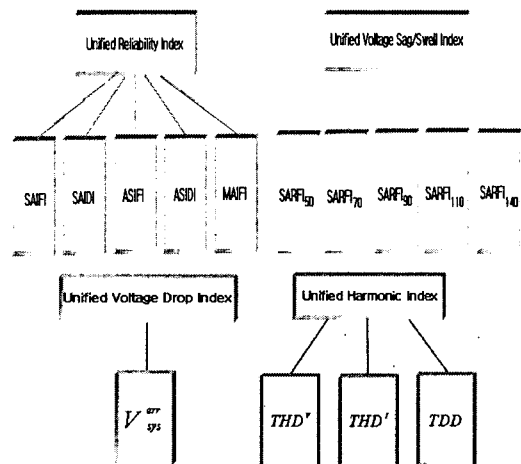


그림 3. 항목별 전력 품질지수의 AHP 모델
Fig. 3. AHP model of item wide indices

2.6 종합전력 품질 통합지수

2.5절에서 산정된 항목별 전력 품질지수를 종합전력 품질 통합지수로 나타내기 위해서 2.1절에서 제안한 AHP 모델을 이용하여 그림 4와 같이 종합전력 품질 통합지수를 산정하였다.

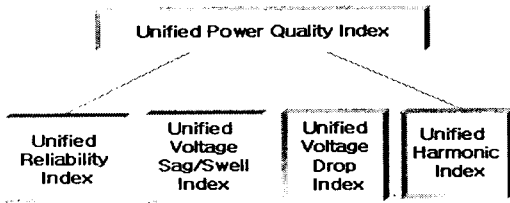


그림 4. 종합전력 품질 통합지수의 AHP 모델
Fig. 4. AHP model of Unified power quality index

2.7 확률론적 종합전력 품질 통합지수

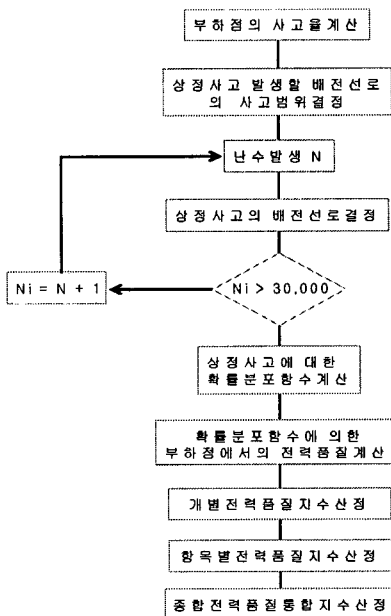


그림 5. 몬테카를로 시뮬레이션을 적용한 흐름도
Fig. 5. Flow chart by using Monte Carlo simulation

2.6절까지 산정된 종합전력 품질 통합지수를 확률론적으로 평가하기 위해서 Monte Carlo Simulation을 도입하여 배전시스템의 모의사고를 발생시켰다.

즉 주어진 계통의 부하점에 가장 근접한 배전선로를 (N-1)의 상정사고를 발생하였으며, 사고를 발생할 수 있는 배전선로의 범위를 부하점에서 계산된 λ_i 를 이용하여 부하점의 λ_i 의 간격에 따라서 배전선로가 상정사고가 날 수 있도록 하였다. 따라서 임의의 난수가 발생시 난수에 의해 발생된 값에 의해서 어떤선로가 사고인지 사고가 아닌지 결정되며 이를 통하여 확률분포함수가 결정된다. 이를 토대로 확률분포에 의해서 배전선로도, 전압Sag/Sewll, 전압변동 및 고조파에 대해서 확률론적으로 부하점의 값을 계산하여 그림 5와 같이 종합전력 품질 통합지수를 평가할 수 있도록 하였다.

3. 사례연구

모델계통은 그림 6과 같이 4가지의 대체안을 종합전력 품질 통합지수를 산정하여 안정성을 정량적으로 평가하였으며 계통자료는 표 2와 같다.

표 2. 계통자료
Table 2. System data

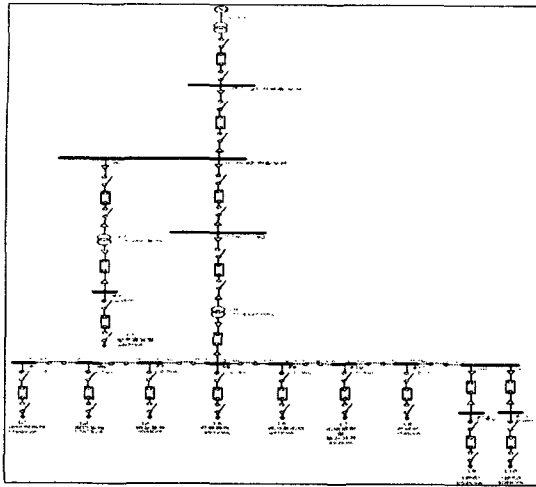
| 부하점 | 부하 종류 | 부하수 [개] | 부하 크기 [KVA] | 부하점 | 부하 종류 | 부하수 [개] | 부하 크기 [KVA] |
|-----|-------|---------|-------------|-----|-------|---------|-------------|
| L1 | 전동기 | 35 | 350 | L6 | 조명 | 1500 | 600 |
| L2 | 전동기 | 110 | 1100 | L7 | 통신 기기 | 1000 | 500 |
| L3 | 전동기 | 110 | 1100 | L8 | 통신 기기 | 1200 | 300 |
| L4 | 전동기 | 110 | 1100 | L9 | UPS | 20 | 500 |
| L5 | 조명 | 1500 | 60 | L10 | UPS | 20 | 500 |

3.1 사전검토사항

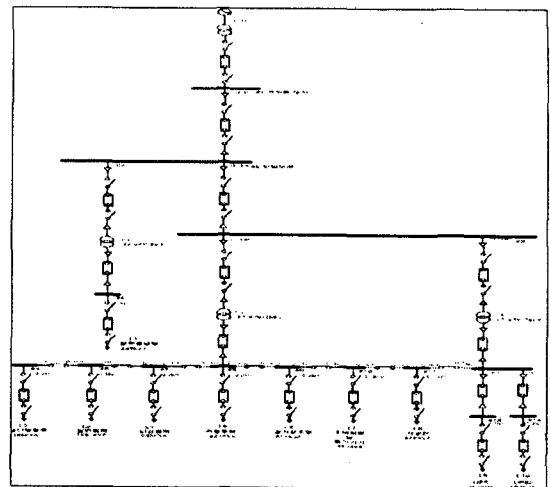
3.1.1 몬테카를로 시뮬레이션에 의한 부하점의 확률분포

모델계통을 2.7절의 과정을 통하여 난수를 30,000번 발생하여 대체안에 대한 배전선로의 사고시의 확률분포는 표 3과 같다.

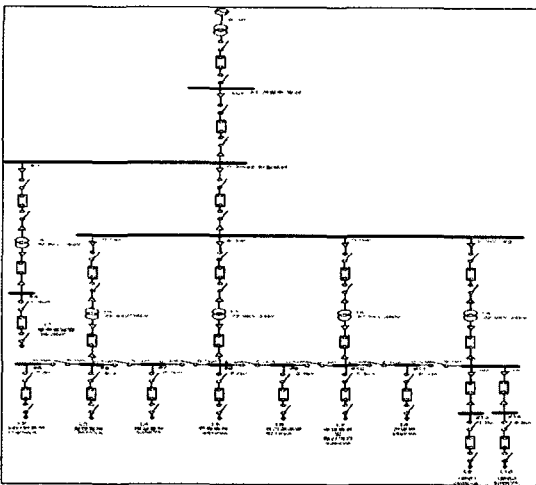
배전시스템 전기설비 구성에 따른 확률론적 전력품질의 정량적 평가기법 개발



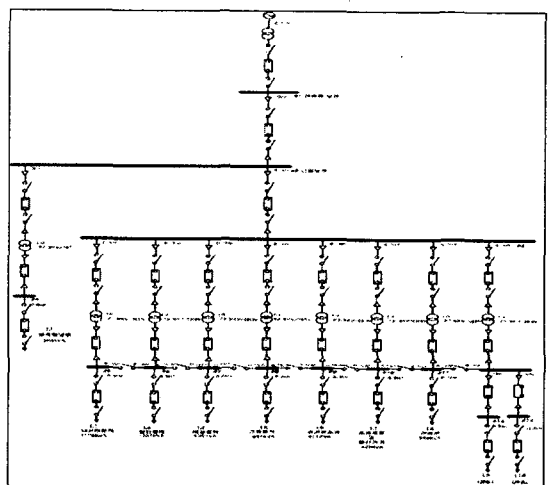
(a) 대체안 1



(b) 대체안 2



(c) 대체안 3



(d) 대체안 4

그림 6. 모델계통의 단선도
Fig. 6. Diagram of cases

표 3. 부하점의 확률분포결과

Table 3. Probability distribution function of load points by using Monte Calro simulation

| LP | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 | 무사고 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Alt1 | .0233 | .0233 | .0200 | .0233 | .0233 | .0266 | .0166 | .0233 | .0267 | .0233 | 0.76997 |
| Alt2 | .0233 | .0233 | .0166 | .0266 | .0233 | .0266 | .0166 | .0233 | .0267 | .0200 | 0.77330 |
| Alt3 | .0200 | .0266 | .0166 | .0233 | .0200 | .0200 | .0233 | .0166 | .0267 | .0200 | 0.78663 |
| Alt4 | .0233 | .0233 | .0200 | .0200 | .0200 | .0200 | .0233 | .0166 | .0267 | .0166 | 0.78997 |

3.1.2 일대일비교행렬

제안한 AHP모델의 부하점, 개별 전력 품질지수, 항목별 전력 품질지수에서 일대일 비교행렬을 구성하였다. 이때 본 연구에서는 부하점의 일대일 비교행렬은 표 2를 적용하여 정밀부하는 Weighing을 크게, 전열설비같은 부하는 작은 Weighing을 적용하여 표 4와 같이 구성하였다. 그리고 개별 전력 품질지수의 일대일비교행렬구성은 표 5

와 같이 신뢰도지수는 각 전력회사별 신뢰도지수의 사용정도에 의해 Weighting을 구성하였고[7], 전압 Sag/Swell 지수는 전압 Sag/Swell에 예민한 부하는 상대적으로 크게, 둔감한 부하는 상대적으로 작게 중요도를 결정하였다. 또한 전압변동지수는 Weighting에 관계없이 1개의 지수만이 존재하므로 일대일비교행렬은 항상 1이 되게 되며, 고조파 지수는 고조파에 예민한 부하는 상대적으로 Weighting을 크게, 둔감한 부하는 상대적으로 Weighting을 작게 결정하였다. 마지막으로 항목별 전력 품질지수는 표 6과 같이 부하점의 영향에 따라 구성하였다. 상기의 과정과 같이 주어진 계통에 따라 Weighting이 다르게 적용되므로 현장의 상황에 따라 Weighting을 적용하면 된다. 즉 일대일비교행렬을 구성하는 방법은 의사결정자의 의지에 따라 반영될 수 있으며 일대일비교행렬을 달리 구성한 Parametric analysis를 수행함으로써 의사결정자의 결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 부하점의 일대일비교행렬구성
Table 4. One-to-one matrix of load point

| LP | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | L6 | L7 | L8 | L9 | L10 |
|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|----|-----|
| L1 | 1 | 0.5 | 0.1 | 0.13 | 0.25 | 0.2 | 0.33 | 0.5 | 2 | 2 |
| L2 | 2 | 1 | 0.2 | 0.33 | 0.33 | 0.33 | 0.5 | 1.25 | 5 | 5 |
| L3 | 10 | 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 5 | 5 | 10 | 10 |
| L4 | 8 | 3 | 0.5 | 1 | 2.5 | 2.5 | 10 | 10 | 20 | 20 |
| L5 | 4 | 3 | 0.5 | 0.4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 | 5 |
| L6 | 5 | 3 | 0.5 | 0.4 | 1 | 1 | 2 | 4 | 10 | 10 |
| L7 | 3 | 2 | 0.2 | 0.1 | 1 | 0.5 | 1 | 2 | 4 | 4 |
| L8 | 2 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.5 | 0.25 | 0.5 | 1 | 4 | 4 |
| L9 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.2 | 0.1 | 0.25 | 0.25 | 1 | 1 |
| L10 | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0.05 | 0.2 | 0.1 | 0.25 | 0.25 | 1 | 1 |

표 5. 개별 전력 품질지수의 일대일비교행렬구성
Table 5. One-to-one matrix of system wide indices

| Reliability | SAIFI | SAIDI | ASIFI | ASIDI | MAIFI |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SAIFI | 1.0 | 0.95 | 2.5 | 1.25 | 2.0 |
| SAIDI | 1.05 | 1.0 | 3.33 | 2.0 | 1.67 |
| ASIFI | 0.4 | 0.3 | 1.0 | 0.67 | 0.83 |
| ASIDI | 0.8 | 0.5 | 1.5 | 1.0 | 1.33 |
| MAIFI | 0.5 | 0.6 | 1.2 | 0.75 | 1.0 |

| Volt. Sag/Swell | SARF50 | SARF70 | SARF90 | SARF110 | SARF140 |
|-----------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| SARF50 | 1.0 | 2.0 | 8.33 | 10.0 | 2.0 |
| SARF70 | 0.5 | 1.0 | 3.33 | 6.67 | 0.83 |
| SARF90 | 0.12 | 0.3 | 1.0 | 2.0 | 0.13 |
| SARF110 | 0.1 | 0.15 | 0.5 | 1.0 | 0.05 |
| SARF140 | 0.5 | 1.2 | 8.0 | 20.0 | 1.0 |

| Voltage drop | V^{err} | Harmonics | THDV | THDI | TDD |
|--------------|-----------|-----------|------|------|------|
| | | THDV | 1.0 | 0.67 | 0.25 |
| V^{err} | 1.0 | THDI | 1.5 | 1.0 | 0.5 |
| | | TDD | 4.0 | 2.0 | 1.0 |

표 6. 항목별 전력 품질지수의 일대일비교행렬구성
Table 6. One-to-one matrix of item wide indices

| Unified Index | Reliability | Volt. Sag/Swell | Volt. drop | Harmonics |
|-----------------|-------------|-----------------|------------|-----------|
| Reliability | 1.0 | 5.0 | 0.2 | 1.33 |
| Volt. Sag/Swell | 0.2 | 1.0 | 0.05 | 0.2 |
| Volt. drop | 5.0 | 20.0 | 1.0 | 4.0 |
| Harmonics | 0.75 | 5.0 | 0.25 | 1.0 |

3.2 계산결과

3.2.1 항목별 전력 품질지수결과

3.1절을 고려하여 2.2절의 계산절차에 의해 산정된 각각의 대체안에 대한 항목별 전력 품질지수와 2.7절을 통한 확률론적 항목별 전력 품질지수의 결과는 그림 7과 같다. 단 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 전압 Sag/Swell은 실제적으로 측정이 어려운 관계로 AHP 모델에서의 값과 동일한 값으로 하였다.

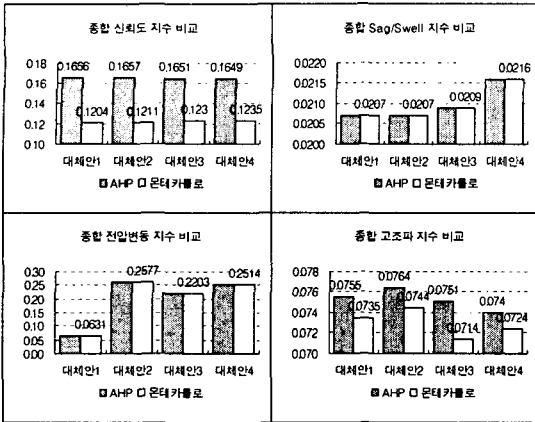


그림 7. 항목별 전력 품질지수 산정결과
Fig. 7. Results of item wide indices

항목별 전력 품질지수 평가시 대체안 별로 지수의 순서가 다른 것을 알 수 있다. 종합 전압변동지수는 본 사례연구에서 9번과 10번 부하점의 부하가 UPS 이므로 계통의 사고 시에도 동일한 값이 도출되었다. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 안정성의 확률론적 평가결과는 신뢰도지수와 고조파지수의 크기의 차이가 있을 뿐 전체적인 각 지수의 평가 결과는 비슷한 Trend를 갖는 것으로 분석되었다.

3.2.2 종합전력 품질 통합지수결과

3.2.1절의 결과를 표 7을 이용하여 2.6절의 과정으로 산정된 종합전력 품질 지수산정결과는 그림 8과 같다.

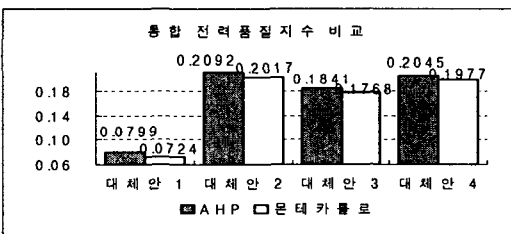


그림 8. 전력품질통합지수산정결과
Fig. 8. Results of unified power quality index

대체안별 통합 전력품질지수는 대체안 1이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 결과는 AHP모델에서의 값과 근소한 차

이가 있었으나 결과의 순위는 같은 것으로 분석되었다. 따라서 여러 개의 대체안이 주어지는 경우에 하나의 통합전력품질지수로 평가할 수 있으므로 서로 간의 우위를 결정짓는데 매우 용이하다 하겠다.

5. 결론

본 논문의 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 전력의 품질요소인 신뢰도, 전압 Sag/Swell, 전압변동, 고조파를 하나의 종합화된 지수로 표시하여 배전시스템의 품질을 정량적으로 산정할 수 있도록 하였다.
- (2) 신뢰도를 고장률로 계산하기 위하여 IEEE Std 1366에서 사용되는 Event의 개념을 고장률 및 고장지속시간으로 표시할 수 있도록 새로이 정식화 하였다. 또한 전압 Sag/Swell도 IEEE Std 1159의 Event 개념을 전압 Sag/Swell 발생률로 표시할 수 있도록 하였다.
- (3) 시스템에 대한 신뢰도와 전압 Sag/Swell을 AHP를 사용하여 시스템에 대한 지수를 계산할 수 있도록 하였다.
- (4) 시스템의 전력품질지수는 각 항목별로 존재하는 여러 개의 지수를 통합하여 통합전력 품질 지수를 평가할 수 있도록 하였다.
- (5) Monte-Carlo Simulation 등에 의해 확률론적인 개념을 포함하는 통합전력품질지수의 개발 하였다

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-B-107) 주관으로 수행된 과제임.

References

- (1) IEEE : IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices, IEEE Std 1366, 2001.
- (2) IEEE : IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std 1159, 1995.
- (3) Math H.J.Bollen, D. Daniel Sabin, Rao S. Thallam: Voltage-Sag Indices - Recent Developments in IEEE P1564 Task Force, 2003.
- (4) IEEE : IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std 519, 1992.

- [5] Thomas L. Satty : The Analytic Network Process. RWS Publications, 1996.
- [6] Roy Billinton, Ronald N. Allen : Reliability Evaluation of Power Systems, Plenum Press, 1984.
- [7] 김용하, 이범 : PLOC를 고려한 배전계통의 신뢰도 계산 및 ANP에 의한 종합적 평가, 조명설비학회, 2000.5.
- [8] 김용하, 이범, 최상규, 이명민, 우성민 : 인천국제공항 여객터미널의 고조파 측정 및 분석, 조명설비학회, 2005.1.
- [9] 김용하, 이성준, 김동근, 오석현, 김미예 : 인천국제공항 여객터미널의 고조파분석에 의한 저감대책 강구, 조명설비학회, 2005.1.

◇ 저자소개 ◇

김용하 (金龍河)

1959년 5월 16일생. 1982년 고려대학교 전기공학과 졸업.
 1987년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사).
 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.
 Tel : (032)770-8434
 E-mail : yhkim@incheon.ac.kr

이성준 (李晟準)

1971년 5월 20일생. 2000년 한국방송대학교 졸업. 2003년 인천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : (032)770-4323
 E-mail : ezze@incheon.ac.kr

우성민 (禹成旻)

1980년 11월 1일생. 2004년 인천전문대 전기공학과 졸업. 2004년 학점은행제 전기공학과 졸업. 2006년 인천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동대학원 전기공학과 박사과정.
 Tel : (032)770-4323
 E-mail : ywoosm@incheon.ac.kr

임현성 (林炫成)

1981년 2월 18일생. 2006년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 인천대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)770-4323
 E-mail : jayou20@incheon.ac.kr

손승기 (孫承基)

1981년 12월 18일생. 2006년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2006년~현재 인천대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)770-4323
 E-mail : ssk9989@nate.com

구민서 (具民書)

1981년 6월 25일생. 2007년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 인천대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
 Tel : (032)770-4323
 E-mail : cookieshop@netsgo.com