2005년도 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집(2005.11.18~19)

전기설비 구성에 따른 배전시스템 안정성의 정량적 평가기법의 개발

김용하*, 이범**, 최상규***, 최영주****, 이광성*****, 연준희******, 임현성*
인천대학교*, 여수대학교**, 안양과학대학***, 인천상수도사업본부****, (주)한화종합기술단*****, 인천공항공사******

Development of Quantitative Stability Evaluation Method for Electric Distribution System

Yong-ha Kim*, Buhm Lee**, Sang-kyu Choi***, Young-ju Choi****, Goang-Sung Lee*****, Jun-hee Yeon******, Hyeon-sung Im*
Incheon Univ.*, Yeosoo Univ.**, Anyang Univ.***, Incheon Waterworks**** , Han Hwa ENG*****, Incheon Airport Corp.******

Abstract - 본 논문에서는 전력의 품질요소 중 배전시스템의 운용에 많은 영향을 미치는 신뢰도, 전압 Sag/Swell, 전압변동, 고조파를 하나의 종합화된 지수로 표시할 수 있도록 하여, 배전시스템의 품질을 정량적으로 표시할 수 있도록 하였다. 또한, 시스템의 전력품질을 하나의 지수로 표현하기 위하여, 각 항목의 중요도를 도출하고, AHP에 의한 통합전력품질지수를 개발하였다.

1. 서 론

오늘날 배전계통에서 수용가가 관심을 갖는 주된 부분은 전력의 안정성(품질, 신뢰성) 및 전력요금이 될 것이며 특히 안정성이 가장 큰 역할을 할 것으로 판단되어진다. 또한, 최근에 문제가 되고 있는 전압, 전류의 파형과 관련된 고조파 역시 중요하다 할 수 있어, 안정성의 요소로는 전압, 신뢰성과 함께 고조파가 포함되는 것이 타당하다 하겠다.

배전시스템을 새로이 설계하거나 확충할 경우에, 단순히 안정성요소가 기준치이내인가로서만 판단하는 것은 바람직하지 못하며, 따라서 설계된 시스템이 얼마나 안정적인가를 정량화된 지수로 판단할 필요가 있다.

본 논문에서는 전력의 품질요소 중 배전시스템의 운용에 많은 영향을 미치는 신뢰도, 전압 Sag/Swell, 전압변동, 고조파를 하나의 종합화된 지수로 표시할 수 있도록 하여, 이 지수로써 배전시스템의 품질을 정량적으로 표시할 수 있도록 하였다. 또한, 시스템의 전력품질을 하나의 지수로 표현하기 위하여, 각 항목의 중요도를 도출하고 ,AHP에 의한 통합전력품질지수를 개발, 제안하였다.

2. 본 론

2.1 전력품질지수

배전계통은 부하점으로 구성되어 있으며, 이들 부하점 이외에도, 계통을 대상연구되어왔다. 본 논문은 계통을 하나의 전력품질지수로 표현하기위해 부하점의 안정성평가, 개별전력품질지수, 항목별전력품질지수, 종합전력품질지수 등으로 구분하였다. 또한, 이들 품질지수를 계산하기위해서 AHP를 필요로 한다.

2.1.2 부하점의 안정성 평가

1. 신뢰도

배전계통은 다양한 종류의 전기설비가 직렬 및 병렬로 복잡하게 연결되어 있다. 이중 고장 등에 의해 전력을 공급할 수 없는 상태를 완전정전상태(Total Loss of Confinuity: 이하 TLOC)를 대상으로 하여 신뢰도의 계산을 하였다. 즉, 전체 계통에 대하여 신뢰도를 구하는 방법으로 직렬 및 병렬회로의 신뢰도 계산에 관거한 계통축약 방법(Network Reduction Method)과 고장모드-효과분석법(Failure modes and Effects Analysis)등을 적용하여 계산하였다. IEEE 1366-2001에서는 정전관련 지수를 정전횟수로 다루었기 때문에, 계통마다 횟수를 세야 하는 문제점이 있어 다음과 같은 확률로 처리한다.

$$N_{Ri} = \lambda_i N_i$$
$$L_{Ri} = \lambda_i L_i \quad (1)$$

여기서,

λ_i : 배전 계통 내 i 부하점의 연간평균고장빈도

r_i : 배전 계통 내 i 부하점의 고장지속시간

N_i : 개별 수용가의 수 ($N_T = \sum N_i$)

L_i : 개별 수용가의 부하 ($L_T = \sum L_i$)

2. 전압 Sag/Swell

본 논문에서는 개개의 Event를 발생빈도로써 처리함으로써, 편리하게 전압 Sag/Swell을 처리하였다.

전압 Sag 로는 다음과 같은 발생률이 존재한다.

① 전압Sag/Swel의 발생률

λ_{90i}, λ_{70i}, λ_{50i}, λ_{10i} : 전압이 90[%], 70[%], 50[%], 10[%]가 되는 Sag의 발생률

여기서, λ_{10i}은 정전과 유사한 상태로써 정전으로 간주하여 처리한다. 또한, 전압 Swell 로는 다음과 같다.

② 전압Sag/Swel의 발생시간

λ_{110i}, λ_{120i}, λ_{140i} : 전압이 110[%], 120[%], 140[%]가 되는 Swell의 발생률

3. 전압변동

부하점의 실제전압은 배전계통에 대한 조류계산을 통하여 얻을 수 있다.

여기서, 전압의 편차는 다음과 같이 계산된다.

$$V_i^{err} = |V_i - 1| \text{ [PU]} \quad (3)$$

여기서,

V_i : 부하점 i의 실제전압 [PU]

4. 고조파

계통의 각 부분의 측정된 고조파수치로부터 고조파조류계산을 통해 얻은 2 ~ 50조파의 고조파전압, 고조파전류를 계산하며, 이들 계산되어 구해진 고조파전압 및 고조파전류로부터 부하점 별로 THD_v, THD_i, TDD_i등의 값으로 평가했다.

① THD(전압 및 전류)

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1}, \quad THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \quad (4)$$

② TDD(전류)

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_{1\,PEAK(15\,or\,30\,min)}} \quad (5)$$

여기서,

V_h : h 차 고조파의 전압치

I_h : h 차 고조파의 전류치

$I_{1\,peak}$: 기본파의 정격최대전류(15~30분간)

2.1.2 AHP의 구조

1. 계통의 각종 전력품질을 위한 AHP

일반적으로 전력의 품질은 계통을 대상으로 설명되며, 따라서 전력품질지수는 계통을 대상으로 한다.

2. 계통을 대상으로 한 전압변동 및 고조파를 계산 AHP

전압변동 및 고조파는 부하점을 대상으로 하여 계산되므로, 계통의 전압변동이나 고조파지수를 계산하기 위하여AHP를 사용하였다.

3. 최선의 상태, 현재계통의 상태, 최악의 상태

부하점에서의 전력의 품질의 값들은 이들 개개의 특성이 상이하기 때문에 동일한 평가를 하는 것은 불가능하다. 그러므로 본 논문에서는 이들 값을 최선의 상태, 최악의 상태 그리고 실제 계통의 계산치가 어느 정도인지를 평가할 수 있도록 하였다.

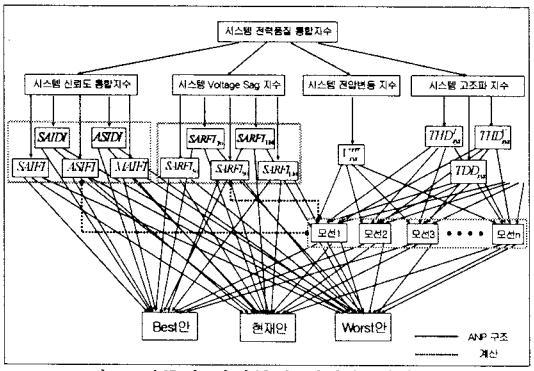


그림 1 계통의 전력품질 계산을 위한 AHP

2.1.3 개별 품질지수의 산정

1. 개별신뢰도지수의 산정

부하점의 신뢰도를 사용하여 신뢰도를 계산하면 다음과 같다.

① SAIFI

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (6)$$

② SAIDI

$$SAIDI = \frac{\sum \lambda_i r_i N_i}{\sum N_i} \quad (7)$$

③ ASIFI

$$ASIFI = \frac{\sum \lambda_i L_i}{\sum L_i} \quad (8)$$

④ ASIDI

$$ASIDI = \frac{\sum \lambda_i r_i L_i}{\sum L_i} \quad (9)$$

⑤ MAIFI

$$MAIFI = \frac{\sum ID_i \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (10)$$

2. 개별전압 Sag/Swell지수의 산정

전압 Sag/Swell은 다양한 시간동안 발생하게 되는데, λ^I_{xi}, λ^M_{xi}, λ^T_{xi} 로 나누어 처리하며, 이들을 사용하여 지수를 구하면 다음과 같다.

$$SIARFI_x = \frac{\sum \lambda^I_{xi} N_i}{\sum N_i} \text{ [순시 전압 Sag/Swell지수]}$$

$$SMARFI_x = \frac{\sum \lambda^M_{xi} N_i}{\sum N_i} \text{ [순간 전압 Sag/Swell지수]}$$

$$STARFI_x = \frac{\sum \lambda^T_{xi} N_i}{\sum N_i} \text{ [일시 전압 Sag/Swell지수]} \quad (11)$$

3. 개별전압변동 지수의 산정

최선치, 계산치, 최악치의 1:1행렬을 구성, 이후 부하점의 1:1행렬을 구성한 다음, Eigen-Value를 계산하면 개별전압변동지수가 된다.

4. 개별고조파 지수의 산정

1:1비교행렬의 Eigen-value를 구하고, 각 부하점 별로, 전압 THD, 전류 THD, TDD를 각각 곱하여 계통전압 THD, 계통전류 THD, 계통 TDD를 각각 계산한다.

2.1.4 항목별 품질지수의 산정

1. 1:1 비교행렬의 구성

신뢰도, 전압Sag/Swell, 전압변동, 고조파에 대한 1:1을 구성한다.

2. 항목별신뢰도지수의 계산

Eigen-value의 계산은 앞의 1:1행렬을 AHP과정의 수렴화를 통하여 계산한다. 구해진 Eigen-value를 각각의 개별지수에 곱하여 더하면 항목별 지수를 얻을 수 있다.

2.1.5 종합 품질지수의 산정

앞의 전압, 전압 Sag/Swell, 고조파, 신뢰도 지수는 각기 다른 수준의 통합지수로 계산된다. 따라서 지수의 통합을 위해서는 각각의 지수를 동일한 수준의 값들로 조정할 필요가 있다. 이를 위하여 AHP를 사용하였으며, 지수를 동일한 수준으로 조절을 위해 중요도를 사용하였다.

2.2 사례연구

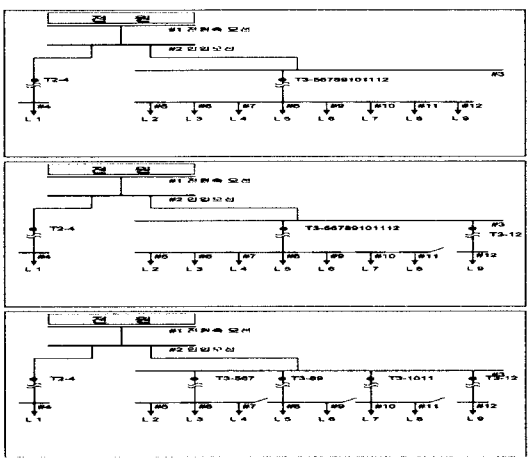
2.2.1 모델계통

모델계통은 현재 건설 중인 체육시설로, 4가지 대체안을 가지고 건설 계획 중에 있다. 계통의 특성자료 및 모델계통은 다음과 같다.

표 1 모델계통의 특성자료

(a) 부하의 종류 및 크기

부하종류	부하크기[KVA]
L1(방축열냉방)	360
L2(냉난방동력)	1160
L3(일반동력)	1287
L4(비상동력)	595
L5(전등,전열)	621
L6(경기장 조명)	621
L7(조명음향 및 통신기기)	422
L8(전광판)	528
L9(UPS)	256



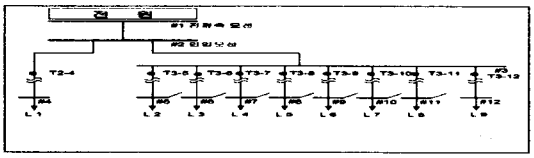


그림 2 모델계통의 단선도(Case1 ~ Case4)

2.2.2 부하점의 전력품질산정

표 2 부하점별 계산치(Case1 ~ Case4)

Case1		최선치	부하점별 계산치 (Case 1)									최악치
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
신뢰도	λ_i	0.	.200	.191	.199	.208	.216	.199	.208	.216	.224	1.
	r_i	0.	33.91	38.83	38.83	38.82	38.81	38.83	38.82	38.81	38.80	100.
	ID_i	0.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10.
	N_i	0.	10	20	110	100	1500	800	1000	1200	20	-
	L_i	0.	360	1160	1287	595	621	621	422	528	256	-
전압 Sag/ Swell	$\lambda_{SD,i}$	0.	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	100.
	$\lambda_{MI,i}$	0.	2.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	100.
	$\lambda_{SI,i}$	0.	12.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	100.
	$\lambda_{IHI,i}$	0.	10.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	100.
	$\lambda_{MH,i}$	0.	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	100.
전압변동	v_i^{var}	0.	6.3	7.9	7.9	7.6	7.4	7.4	7.6	7.6	7.6	100.
고조파	THD_i^V	0.	6.63	9.65	9.60	9.51	9.40	9.49	9.56	9.61	9.62	100.
	THD_i^I	0.	11.02	12.37	12.14	9.29	6.07	7.06	17.27	15.75	0.42	100.
	TDD_i	0.	6.6	7.2	7.1	5.7	3.9	4.5	9.5	8.7	29.6	100.

Case1		최선치	부하점별 계산치 (Case 1)									최악치
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
신뢰도	λ_i	0.	.200	.191	.199	.208	.216	.199	.208	.216	.191	1.
	r_i	0.	33.91	38.83	38.83	38.82	38.81	38.83	38.82	38.81	38.83	100.
	ID_i	0.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10.
	N_i	0.	10	20	110	100	1500	800	1000	1200	20	-
	L_i	0.	360	1160	1287	595	621	621	422	528	256	-
전압 Sag/ Swell	$\lambda_{SD,i}$	0.	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.7	100.
	$\lambda_{MI,i}$	0.	2.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	3.0	100.
	$\lambda_{SI,i}$	0.	12.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	15.0	100.
	$\lambda_{IHI,i}$	0.	10.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	14.0	100.
	$\lambda_{MH,i}$	0.	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.5	100.
전압변동	v_i^{var}	0.	6.3	7.9	7.9	7.6	7.4	7.4	7.6	7.6	0.0	100.
고조파	THD_i^V	0.	6.55	8.70	8.66	8.56	8.45	8.53	8.58	8.62	20.00	100.
	THD_i^I	0.	11.09	12.48	12.13	9.36	6.12	7.22	17.61	16.01	5.83	100.
	TDD_i	0.	6.6	7.2	7.1	5.7	3.9	4.5	9.4	8.7	29.3	100.

Case1		최선치	부하점별 계산치 (Case 1)									최악치
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
신뢰도	λ_i	0.	.200	.191	.199	.199	.191	.199	.191	.199	.191	1.
	r_i	0.	33.91	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	100.
	ID_i	0.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10.
	N_i	0.	10	20	110	100	1500	800	1000	1200	20	-
	L_i	0.	360	1160	1287	595	621	621	422	528	256	-
전압 Sag/ Swell	$\lambda_{SD,i}$	0.	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	100.
	$\lambda_{MI,i}$	0.	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	2.5	2.6	2.6	3.0	100.
	$\lambda_{SI,i}$	0.	12.0	12.0	12.0	12.0	14.0	14.0	13.0	13.0	15.0	100.
	$\lambda_{IHI,i}$	0.	10.0	10.0	10.0	10.0	12.0	12.0	12.0	12.0	14.0	100.
	$\lambda_{MH,i}$	0.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.3	1.3	1.5	100.
전압변동	v_i^{var}	0.	6.3	6.3	6.3	6.3	7.1	7.1	6.3	6.6	0.0	100.
고조파	THD_i^V	0.	6.73	6.99	6.95	6.96	7.08	7.10	9.26	9.29	19.95	100.
	THD_i^I	0.	11.09	12.45	12.21	9.34	6.12	7.22	17.57	15.98	5.92	100.
	TDD_i	0.	6.6	7.2	7.1	5.7	3.9	4.5	9.4	8.7	29.3	100.

Case1		최선치	부하점별 계산치 (Case 1)									최악치
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	
신뢰도	λ_i	0.	.200	.191	.191	.191	.191	.191	.191	.191	.191	1.
	r_i	0.	33.91	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	38.83	100.
	ID_i	0.	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	10.
	N_i	0.	10	20	110	100	1500	800	1000	1200	20	-
	L_i	0.	360	1160	1287	595	621	621	422	528	256	-
전압 Sag/ Swell	$\lambda_{SD,i}$	0.	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	100.
	$\lambda_{MI,i}$	0.	2.0	2.0	2.0	2.0	2.5	3.0	2.6	2.6	3.0	100.
	$\lambda_{SI,i}$	0.	12.0	12.0	12.0	12.0	14.0	15.0	13.0	13.0	15.0	100.
	$\lambda_{IHI,i}$	0.	10.0	10.0	10.0	10.0	12.0	14.0	12.0	12.0	14.0	100.
	$\lambda_{MH,i}$	0.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.5	1.3	1.3	1.5	100.
전압변동	v_i^{var}	0.	6.3	7.9	7.4	6.3	6.6	6.6	6.8	6.1	0.0	100.
고조파	THD_i^V	0.	6.72	8.51	8.41	6.31	6.28	6.61	9.35	8.44	19.94	100.
	THD_i^I	0.	11.02	12.36	12.13	9.29	6.07	7.16	17.47	15.83	5.91	100.
	TDD_i	0.	6.6	7.2	7.1	5.7	3.9	4.5	9.4	8.7	29.4	100.

2.2.3 개별, 항목별, 통합 전력품질지수산정

부하점별전력품질지수는 표 2를 적용하여 신뢰도, 전압 Sag/Swell, 전압변동, 고조파의 각각의 지수별로 시스템지수를 산정하였고, 앞서 계산한 개별지수 중 IEEE 등에서 명시한 시스템지수 외에 직접 계산을, 명시되지 않은 시스템지수는 AHP를 사용하여 계산하였다. 그러나 신뢰도, 전압 Sag/Swell, 고조파 등은 여러 개의 지수가 존재하므로, 하나의 지수로 나타내기 위하여 종합신뢰도를 계산하였다. 또한, 통합 전력품질지수를 산정하기 위하여, 각 종합지수별 1:1행렬을 구성하였다. 이들의 중요도는 부하점의 영향에 따라 구성하였고, 계산결과는 다음표와 같다.

표 3 계산결과

통 합 지 수	Eigenvalue
신뢰도	.159620
전압 Sag/Swell	.031178
전압변동	.663228
고조파	.145973

통합 전력품질지수	
대체안 1	0.09113
대체안 2	0.09024
대체안 3	0.08148
대체안 4	0.08288

표 3은 각 대체안별 전력품질지수가 어느 정도인지를 나타내고 있다. 설비가 증가하나, 전력공급구조가 간단해지는 대체안 3, 4가 전력품질지수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 대체안 1 < 대체안 2 < 대체안 4 < 대체안 3 의 순서로 품질이 증가하고 있는데, 대체안 4 보다 대체안 3의 품질이 증가하고 있어, 신뢰도만으로 평가하는 경우에는 대체안 4가 가장 우수한 특성을 가지나, 다른 요소를 모두 포함하여 통합전력품질지수를 계산하면 다른 결과가 얻어지고 있음을 알 수 있다. 여기서의 통합지수는 대체안 끼리의 경쟁이 아닌 객관화된 지수로 나타나므로, 하나의 시스템에 대한 평가는 지수로, 여러 개의 대체안이 주어지는 경우는 서로간의 우위를 결정짓는데 매우 용이하다 하겠다.

3. 결 론

이들 지수들을 검토한 결과 신뢰성과 관련하여서는 차단기, 변압기 등의 개수가 증가하더라도 전원과 부하점이 간략화 되어 있는 시스템이 우수함을 알 수 있었다.
고조파와 관련하여서는 고조파의 발생이 많은 설비는 별도의 변압기를 설치하는 것이 바람직함을 알 수 있었다. 시스템 내의 부하를 설치함에 있어, 고조파의 영향을 받는 정도가 비슷한 부하끼리 모아서 설치하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] McGraw-Hill, Roger C.Dugan, Mark F.McGranaghan, H.Wayne Beaty "Electrical Power Systems Quality" 1996
[2] WILEY, Enrique Acha, Manucl Madrigal, "Power Systems Harmonics" 2001
[3] 대한전기학회지, 김용하, 이범, 최상규, 이명민, 이성준, 최영주, "통신에 미치는 영향을 고려한 고조파 대책수립에 관한 연구", 7. 2004
[4] 조명전기설비학회지, 김용하, 연준희, 이명민, 이성준
[5] 인천대학교, 황봉수, "배전계통 고조파 저감대책의 종합의사결정을 위한 ANP적용에 관한 연구". 2004