

배전계통의 전력품질 및 신뢰도 평가의 방법

김재철 · 윤상윤

(승실대 전기공학과)

1. 서론

배전계통은 전력계통의 최말단 설비이며 수용가에 직접 전력을 공급한다는 특성때문에 배전계통에서 발생하는 외란은 대부분 그대로 수용가에 영향을 미친다. 따라서, 배전계통에서 발생하는 외란을 분석하여 현재 및 향후 해당계통의 전력공급의 신뢰성 및 전력품질을 평가하는 작업 또한 오랫동안 시행되어왔다. 배전계통의 신뢰도는 계통 운전계획의 수립 및 시설 투자의 배분 등에 기초가 되는 관계로 국내·외 대부분의 전력회사에서는 많은 종류의 신뢰도 평가 방식을 만들어 왔다. 이러한 신뢰도 평가 방식들은 대부분 수용가에 발생하는 영구정전(sustained interruption)의 지속시간 및 빈도를 그 결정계수로 이용하고 있다. 그러나, 최근 수십년간의 전력전자 및 반도체 기술의 이용을 통한 수용가 설비의 자동화 및 정보화 추세는 산업체 및 빌딩에서부터 소규모의 주택가에 이르기까지 대부분의 수용가에서 전력 외란에 민감한 정밀 전자기기 및 반도체 스위칭소자를 이용한 장비들의 보편적 사용을 가능하게 했다. 더욱이, 도심지 배전계통의 단거리, 고밀도 화 현상은 이제까지 신뢰도 측정 영역에 포함되지 못했던 단시간의 전력품질 문제에 의한 피해를 증폭시키고 있다. 또한, 최근 국가적으로 추진되는 전력산업구조개편의 경우, 단기적으로는 에너지의 수급 및 경제적 측면에 대한 고려에 치중하고 있으나, 향후 여러 배전회사에 의한 배전계통 분리운용 시의 전력품질 유지 및 향상 대책의 수립 또한 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다.

여기에서는 국내·외에서 보편적으로 이용되는 배전계통에서의 신뢰도 및 전력품질 평가 방식을 소개하며 그 장단점을 분석하였다.

2. 전력품질 및 신뢰도 용어의 정의

배전계통에서의 전력품질 및 신뢰도 평가 방식을 소개하기 전에 무엇보다도 선행되어야 할 것은 관련 용어의 정의

부분이라 할 수 있다. 이것이 중요한 이유는 아직까지 이 분야의 용어가 통일되지 않고 있으며 각종 표준(standards), 저서 및 논문 등에서 그 정의가 분분하여 사용자에게 많은 혼란을 야기하고 있기 때문이다.

전력품질 용어의 표준화를 위해 IEEE (SCC22 (Std. Coordinating Committee 22), IAS, PES), IEC, CIGRE 등의 여러 단체에서 많은 노력을 경주해왔다. '전력품질(power quality)'은 경우 대부분의 규격에서 '전력설비의 동작에 적합하도록 하는 외란에 민감한 설비의 전력 및 접지 개념(the concept of powering and grounding sensitive equipment in a manner that is suitable to the operation of that equipment)' 이라고 정의된다[1-5]. 이와 개념은 유사하나 IEC의 경우 전력품질(power quality)이라는 용어대신 EMC(electromagnetic compatibility)[5-6]라는 용어를 사용한다. 전력회사에 의해 제어될 수 있는 전력품질 요소가 거의 유일하게 전압이므로 전력회사 측면에서의 전력품질은 전압품질(voltage quality)이라고도 불린다[4-5]. 전력품질에 영향을 주는 외란은 대표적으로 전압 크기(voltage magnitude)에 관련된 것과 파형(waveform)의 왜곡에 관련된 것으로 구분할 수 있다. 표 1에는 대표적인 전력품질 용어들을 정의[4,7-9]하였다. 물론, 여기에서의 정의가 관련 종사자들에게 또 다른 혼란을 야기할 우려 또한 배제할 수 없으나 최대한의 객관성을 유지하기 위해 ANSI/IEEE 및 IEC 표준 규격의 용어정의를 기초하여 작성하였다.

3. 배전계통에서의 전력품질의 평가 방식

배전계통에서의 전력품질 평가는 1979년 T. S. Key에 의해 발표된 논문[10]을 그 시초로 보는 것이 일반적이다. Key는 미 해군소속의 연구원으로 컴퓨터에서 발생하는 잦은 가동중지의 원인을 파악하기 위한 목적으로 특정 지점의 전력외란을 모니터링 하였으며 대부분 전압 크기의 품질문제를 모니터링 하였다. Key의 연구 이후로 전력품질 문제에 대한 많은 연구가 진행되었으며 대표적인 분류로는

표 1. 전력품질 용어의 정의

용어(terms)	정의(definition)	지속시간	크기(P.U.)
임펄스 과도현상 (impulse transients)	극성이 없는 전압, 전류의 정상상태시 갑작스런(전력주파수가 아닌) 변화	50ns미만~ 1ms이상	
진동 과도현상 (oscillatory transients)	극성을 포함한 전압, 전류의 정상상태조건에서 갑작스런(전력주파수가 아닌) 변화	5 μ s~50ms	
중간 주파 과도현상 (medium frequency transients)	5~500kHz 대역의 과도현상	수십 msec	
저주파 과도현상 (low frequency transients)	5kHz이하 대역의 과도현상	0.3~50msec	
장기간 전압변동 (long-duration voltage variation)	교류전압 실패치의 변동으로 과전압, 저전압 및 영구정전 등이 있음	1min 이상 or 2min 이상	
과전압(overvoltage)	교류전압 실패치의 변동	1(or 2)min 이상	1.1~1.2
부족전압(undervoltage)	교류전압 실패치의 변동	1(or 2)min 이상	0.8~0.9
영구정전(sustained interruption)	교류전압 실패치의 변동, 전력보수원의 계통복구 필요	1(or 2)min 이상	0.0
단기간 전압변동 (short-duration voltage variation)	지속시간에 따라 instantaneous, momentary, temporary 등으로 분류	0.5cycles~ 1(or 2) min	
순시(instantaneous)	sag, swell 해당	0.5~30 cycles	
순간(momentary)	interruption(지속시간 0.5cycles ~ 3sec), sag, swell 해당	30cycles~ 3(or 2) sec	
일시(temporary)	interruption, sag, swell 해당	3sec~1 min or(2sec~2 min)	
순간전압강하(sag or dip)	교류전압 실패치의 순간적 감소 현상으로 IEEE와 IEC에서 각각 sag 및 dip이라는 용어 사용	0.5cycles~ 1(or 2) min	0.1~0.9
순간과전압(swell)	교류전압 실패치의 순간적 증가 현상	0.5cycles~ 1(or 2) min	순시: 1.1~1.8 순간: 1.1~1.4 일시: 1.1~1.2
순간정전(momentary interruption)	교류전압 실패치의 순간적 감소 현상	0.5cycles~ 1(or 2) min	0.1 미만
전압 불평형(voltage imbalance)	3상전압, 전류의 평균에서 최대편차값을 그의 평균값으로 나눈 것%	정상상태 (steady state)	
파형의 왜곡(waveform distortion)	전력주파수(power frequency)의 이상적인 정현파에서의 정상상태 편차, DC offset, 고조파, 내부고조파, Notching, Noise 등으로 구분	정상상태	
DC offset	교류 시스템에서의 직류전압, 전류의 존재	정상상태	0~0.1%
고조파(harmonics)	정현과전압, 전류의 기본주파수(50내지 60Hz)의 정수배의 주파수	정상상태	0~20%
내부고조파(interharmonics)	전압, 전류에서 기본주파수(50내지 60Hz)의 정수배가 아닌 주파수 요소, 이산적인 주파수나 광대역의 스펙트럼	정상상태	0~2%
나칭(notching)	전류가 1상에서 다른 상으로 정류될때 전력전자장치의 정상운전에 의해 일어나는 주기적인 전압 장애	정상상태	
잡음(noise)	중첩되는 200kHz이하의 광대역의 스펙트럼 크기를 가지는 예기치 않는 전기적인 신호	정상상태	0~1%
플리커(flicker)	부하전류의 크기가 연속적이고 빠른 변동을 나타낼 때 전등의 밝기가 전압동요에 의해 인간의 눈에 의해 인식되어지는 것	간헐적임	0.1~7%
CBEMA 곡선	Computer Business Equipment Manufacturer Association의 약자로 전압크기의 품질을 설명하기 위한 데이터 표현에 가장 많이 사용됨, 연속적인 형태의 곡선 형태를 가짐		
ITIC 곡선	Information of Technology Industry Council의 약자로 CBEMA 곡선의 개정된 형태, 이산형태의 곡선 형태를 가짐		

모니터링 시스템을 기반으로 한 수용가의 전력품질 조사 (survey), 전력품질 문제의 해석(analysis), 전력품질 향상을 위한 전력회사 및 수용가 설비의 대책(countermeasure) 수립 등으로 분류할 수 있다. 본 장에서는 이 중에서도 전력 품질 문제의 해석 방식인 전력품질 평가 방식을 요약하였다. 여기에서는 전력품질 문제를 크게 전압크기의 품질 문제와 파형의 왜곡문제로 나누어 각각의 평가 방식을 소개하였다.

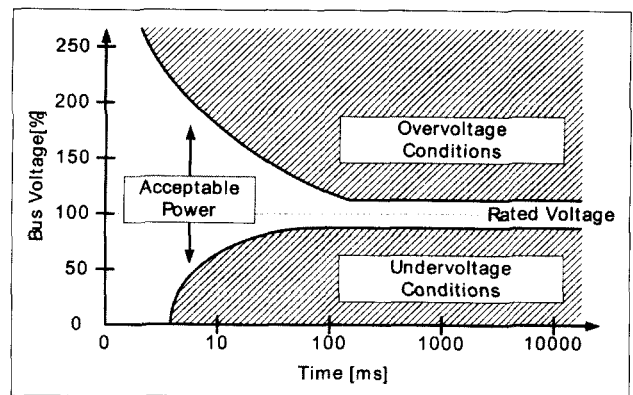
3.1 전압크기의 품질 문제(voltage magnitude quality)의 평가 방식

표 1에서도 설명한 바와 같이 전압크기의 품질문제라 함은 지속시간을 무시하고 생각하면 정전(interruption), 전압강하(undervoltage or sag) 및 전압상승(overvoltage or swell)의 3가지로 구분할 수 있다. 사실상의 대부분의 전력품질 해석부분의 논문이 상당수 이 분야에 치우치고 있는 것이 사실이나, 아직까지는 구체화된 방식으로 인정되고 있지는 않다[9]. 전압크기의 품질 문제의 평가 방식은 기본적으로 외란의 발생 횟수 및 지속시간 등을 추정하는 방식이 있다. Conrad 및 Bollen은 대표적인 전압 품질 해석방식의 논문들[11-13]을 발표하였다. 전압품질 해석의 요지는 외란의 크기와 지속시간을 판단하는 것이다.

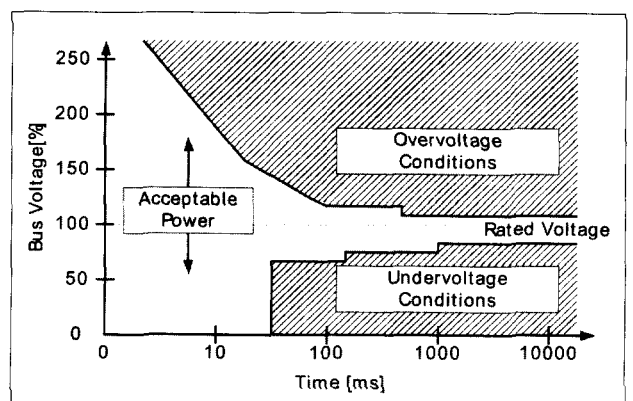
전압크기의 품질 문제의 평가 방식은 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫째는, 수용가 설비의 전력 민감도 곡선을 이용하여 외란에 의한 영향을 직접적으로 평가하는 방식이 있으며 둘째는, 외란의 발생 횟수를 기준으로 전반적인 배전 계통의 영향을 평가하는 방식이며 마지막으로, 에너지량을 이용한 평가방식이 있다.

대표적인 전력 민감도 곡선(power acceptable curve)[5, 7-9,14]은 그림 1(a)에 소개한 CBEMA(Computer Business Equipment Manufacturer Association)곡선과 그림 1(b)의 ITIC(Information of Technology Industry Council) 곡선이 있다. 전력 민감도 곡선의 내부는 전력공급이 지속될 수 있는 구역을 나타내며 전압변동의 크기(ΔV)와 지속시간을 축으로 하여 구성된다. ITIC 곡선은 개념적으로는 CBEMA 곡선과 유사하며 다만, 곡선의 형태가 연속적 형태인 CBEMA 곡선에 비해 이산적인 형태를 가진다. CBEMA 곡선은 1987년 IEEE Std. 446에서 소개된 형태이며, 불행하게도 아직까지 모든 종류의 수용가 부하와 1상 및 3상에 모두 적용되도록 가능한 전력 민감도 곡선(CBEMA 혹은 ITIC 형태)의 곡선은 없다. 다만, 그 형태만을 제시한 것뿐이며 실제적으로 수용가 장비에 대한 그 영향을 실험에 의해 제시한 것은 참고문헌 [15-17]에 제시되었다.

발생 횟수를 기준으로 한 평가방식의 경우, 가장 대표적인 것으로는 Brown[18] 등의 평균 순간정전 발생 횟수(momentary average interruption frequency index: MAIFI)와 Dugan[19] 등의 시스템 평균 실효치 변동 빈도(system average RMS variation frequency index: SARFI_k)가 있다. MAIFI의 경우, 식 (1)과 같이 나타내어진다. 여기서 전체 수용가 호수는 평가 대상 시스템내의 전체 수용가 수를 의



(a) CBEMA 전력 민감도 곡선



(b) ITIC 전력 민감도 곡선

그림 1. 전력민감도(power acceptability) 곡선

미하며 순간정전 발생 횟수는 평가 대상 시스템 내에 발생한 총 순간정전 발생 횟수를 의미한다. 대부분의 경우, 평가기간을 1년을 기준하므로 1년간 발생한 총 순간정전 발생 횟수를 의미한다. 실제 신뢰도 평가를 위한 방법론은 Monte Carlo 기법[20], Markov Chain 등 여러 가지 방식이 있을 수 있으나 여기에서는 이러한 방법론적인 내용은 생략하였다.

$$MAIFI = \frac{\sum \text{순간정전 발생 횟수}}{\text{전체 수용가 호수}} \quad (1)$$

SARFI_k의 경우 외란의 크기와 지속시간에 의해 몇 가지 지수로 나뉘어지며 식 (2)에서 식 (5)까지와 같이 나타낼 수 있다. 외란의 지속시간에 따라 순시(instantaneous)에 대해 SIARFI_k로, 순간(momentary)에 대해 SMARFI_k로, 일시(temporary)에 대해 STARFI_k로 정의된다. 이는 그림 2에서 보는 바와 같이 1회의 전압 외란 발생에 의해 실제로 발생할 수 있는 파형의 형태를 모니터링하고 이를 바탕으로 전압품질을 평가하는 방식이다. 이것은 신뢰도 평가방식과 같은 정형화된 평가 방법론을 이용하는 식 (1)의 MAIFI의 경우와는 달리 계통 각 부의 모니터링에 의해 취득된 전압외란 파형을 기준으로 평가하는 방식이다.

$$SARFI_x = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (2)$$

여기서, x = 실효치 전압의 경계값으로 140, 120, 110, 90, 80, 70, 50, 10 등이 가능

N_i = 크기 $x\%$ 이상($x > 100$)이나 혹은 $x\%$ 이하 ($x < 100$)의 단시간전압변동(short-duration voltage variation)을 경험한 수용가 수

N_T = 평가 대상시스템 내의 총 수용가 수

$$SIARFI_x = \frac{\sum NI_i}{N_T} \quad (3)$$

여기서, NI_i = 크기 $x\%$ 이상($x > 100$)이나 혹은 $x\%$ 이하 ($x < 100$)의 순시전압변동(instantaneous voltage variation)을 경험한 수용가 수

$$SMARFI_x = \frac{\sum NM_i}{N_T} \quad (4)$$

여기서, NM_i = 크기 $x\%$ 이상($x > 100$)이나 혹은 $x\%$ 이하 ($x < 100$)의 순간전압변동(momentary voltage variation)을 경험한 수용가 수

$$STARFI_x = \frac{\sum NT_i}{N_T} \quad (5)$$

여기서, NT_i = 크기 $x\%$ 이상($x > 100$)이나 혹은 $x\%$ 이하 ($x < 100$)의 일시전압변동(temporary voltage variation)을 경험한 수용가 수

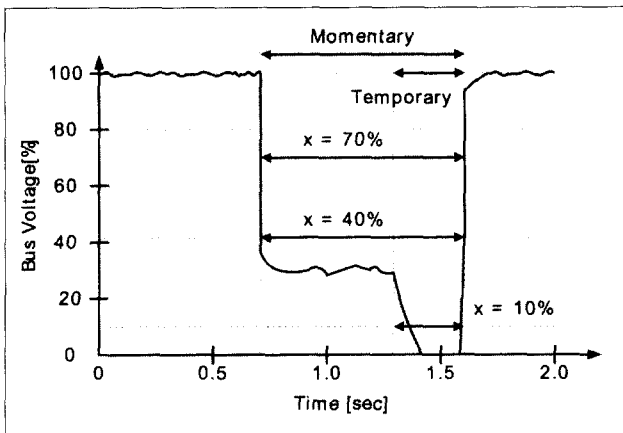


그림 2. 전압외란의 지속시간 별 분류

언급한 방식들(전력 민감도 곡선, 발생횟수에 의한 평가 방식)은 현재까지 제시되어 있는 가장 대표적인 전압외란의 평가 방식이라는 것은 틀림없다. 그러나, 이 방식들을 적용하는데는 몇 가지 문제점들이 존재한다.

1) 평가지수를 이용한 방식들은 횟수만을 기준으로 평가하고 있다는 점이다. 바꿔 말하면, 이 평가지수들은 전적으로

로 전력회사 기준의 평가방식이라는 점이다. 수용가측의 부하는 단순히 발생 횟수에 의해 영향을 측정할 수 있는 것이 아니라는 것이다. 예를 들어, 전압외란에 매우 둔감한 설비의 경우, 매우 순간적이며 전압변동폭도 적은 외란이 여러번 발생한 경우와 매우 심각한 전압변동과 긴 지속시간의 외란이 1회 발생한 경우를 생각해보자. 이 경우 위의 언급한 지수로는 우열을 평가하기가 불가능하다는 것이다.

2) 전력 민감도 곡선을 이용한 평가와 횟수에 의한 평가 지수는 1상 및 3상 외란의 영향을 구분하지 못한다는 점이다. 예를 들어, 어떤 3상 시스템에서 1상에 발생한 전압강하와 3상 모두에 발생한 전압강하는 어떻게 취급해야 하는가의 문제점이 있다.

3) 배전계통에서 일반적으로 사용하는 보호계전방식인 재폐로(reclosing) 방식은 1번의 계통 사고에 의해 수 차례의 전압외란을 수용가에 발생시킨다. 이 경우 단시간에 동일 원인에 의해 발생하는 수 차례의 이 같은 외란을 몇 회로 인식할 것인가 하는 문제이며 또한 지속시간의 결정도 문제가 될 수 있다는 점이다. Bollen[5]은 이같은 문제에 대해 몇 가지의 가능한 해법을 제시하고 있다. 예를 들어, 1회의 사고에 의한 수 차례 전압외란을 모두 개별적으로 계상(count)하는 방식과 수분내의 지정된 지속시간 이내의 반복되는 전압외란은 창(window)을 씌워 1개의 전압외란으로 계상하는 방식을 제안하였다. 그러나, 창을 이용한 이러한 특성화 방식도 여러 개의 이벤트의 특성 중 어느 것을 기준으로 창의 크기와 지속시간을 결정하는가에 따라 많은 차이를 보인다.

4) 마지막으로, SARFI_x 지수는 계통내의 모니터링을 통한 발생 외란의 파형 분석(그림 2)을 통해 계산된다는 점이다. 결정적으로 이러한 점이 이 평가 지수를 실제 배전계통에 적용시키기 힘들게 하는 요소이다.

위에 언급한 평가방식들의 단점을 극복하기 위해 비교적 최근에 제시된 방식의 하나가 에너지량을 이용한 전압품질 평가방식이며 Heydt[21]에 의해 제안되었다. 기존의 전력 민감도 곡선의 상부 곡선은 부하의 전기적 스트레스, 반도체 접점 전압 및 부하의 최대 전력 및 에너지 처리 능력의 제한치를 정의하고 있으며 하부 곡선은 부하의 에너지 저장 및 이용을 정의하고 있다. 이것은 부하들마다 각기 다르며 따라서 부하마다 각기 다른 전력 민감도 곡선의 특성을 가지게 되며 CBEMA 및 ITIC 곡선 등은 3상부하에 대한 영향 평가를 수행할 수 없다. Heydt의 경우 전력 민감도 곡선의 상 하부 경계치를 일정한 에너지의 궤적으로 보았으며, 따라서 전력 민감도 곡선은 다음 식 (6)과 같은 형태로 나타내어져야만 한다고 했으며 이러한 형태의 곡선을 로그 축 상에서 도시하여 식 (7)과 같은 직선형태를 제시하였다.

$$\Delta|V|^k \cdot \Delta t = \text{Constant} \quad (6)$$

$$k \cdot \log \Delta|V| = -\log \Delta t + K \quad (7)$$

전력 민감도 곡선이 일정에너지의 궤적이 된다는 가정하



에, 이 곡선들은 3상 및 서로 다른 부하의 민감도 범위를 적용하도록 확장되었다. 즉, 3상 부하에 대한 고려에서 과전압(overvoltage) 문제의 경우, 결선 방식에 따라 계산상의 차이는 있으나 상전압(phase to neutral) 최대 값(max $\Delta|V|$)을 나타내는 것을 기준으로 에너지를 계산한다. 저전압 문제의 경우, 각 상의 $\Delta|V|$ 값들을 합산하여 계산한다. 이때 지속시간 Δt 가 3상 모두 동일할 경우는 관계없으나 그렇지 못할 경우는 각 상별로 에너지를 각기 계산한다. 이를 요약한 것을 표 2에 나타내었다. 따라서, 각 1상 및 3상 외란에 의한 에너지의 과다 및 손실 값을 계산하여 이를 기준으로 계통에서의 전력품질을 평가하도록 한 것이다.

표 2. 전력민감도 곡선의 3상 확장

결선방식	과전압(overvoltage)	저전압(undervoltage)
volts(or kV) 단위인 경우		
Y	$\sqrt{3} \max(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(\Delta V_{an} + \Delta V_{bn} + \Delta V_{cn})/\sqrt{3}$
Δ	$\max(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(\Delta V_{an} + \Delta V_{bn} + \Delta V_{cn})/3$
P.U. 단위인 경우		
Y	$\max(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(\Delta V_{an} + \Delta V_{bn} + \Delta V_{cn})/3$
Δ	$\max(V_{an}, V_{bn}, V_{cn})$	$(\Delta V_{an} + \Delta V_{bn} + \Delta V_{cn})/3$

그러나, 이와 같은 에너지 양을 이용한 평가 방식 또한 다음과 같은 몇 가지의 문제점을 안고 있다.

1) Heydt 자신도 언급한 바와 같이 어떤 특정 부하에 대한 전력 민감도 곡선의 규정은 아직까지 존재하지 않는다. 따라서, 위에 설명한 에너지 양을 계산하기 위해서도 현실적으로 많은 모순점들이 존재하는 것이 사실이다.

2) 역시 이 경우에도 발생한 전압외란에 대한 특성이 정의되어야만 하나, 앞서 언급한 평가방식들의 경우처럼 실제 계통에서 발생하는 전압외란의 특성을 정의하는 것 또한 실제적으로 매우 어려운 실정이다.

3.2 파형의 왜곡문제(waveform distortion)의 평가 방식

파형의 왜곡문제는 일반적으로 고조파(harmonics)를 의미한다. 고조파 평가지수 중 대표적인 것은 총 고조파 왜곡(total harmonic distortion: THD)이다. THD는 기본파 성분에 대한 고조파들의 실효치 값으로 표현된다. 대부분의 규정들은 2차에서 50차까지의 고조파를 계산한다. THD는 다양한 시스템 디바이스상의 스트레스를 나타낼 수 있다. 인덕턴스에 적용된 THD는 코일이나 유도 전동기등과 같은 인덕턴스들의 부가적 열적 스트레스를 측정하기 위한 것이다. 캐패시터에 적용된 THD는 직렬 인덕턴스가 없는 시스템에 직접적으로 연결된 캐패시터의 부가적 열적 스트레스를 측정하기 위한 것이다. 전류에 대한 파형 왜곡의 경우 THD와 구별하기 위해 총수요왜곡(total demand distortion: TDD)하며, THD와 달리 기본파 전류대신 정격전류(rated

current)를 분모로 사용한다. 또한 내부고조파(interharmonics)에 대한 평가지수인 총 내부고조파 왜곡(total interharmonic distortion: TIHD) 등이 있다. 그밖에 통신 설비에 대한 고조파의 영향을 평가하는 지수들이 있으나 여기에서는 생략하였다. 파형의 왜곡요소는 아니지만 전압 불평형에 대한 평가 지수인 상-전압 불평형(phase-voltage unbalance)과 대칭분 요소에 의한 불평형 문제의 평가 방식이 있다. 또한, 플리커 현상을 평가하기 위한 방법으로 단시간 플리커 가혹도(short-term flicker severity)와 장시간 플리커 가혹도(long-term flicker severity)가 있다. 표 3에는 대표적인 고조파와 전압불평형 평가지수를 수록하였다 [8]. 이 밖에도 많은 부분의 파형 왜곡에 관한 평가 지수들이 발표되었으며 여기에서 수록한 것은 그 중 대표적인 일부를 소개하였다. 이미 소개한 지수를 포함한 대표적인 파형 왜곡에 대한 평가 지수들은 참고문헌 [4], [8] 및 [21]에 제시되어 있으므로 참고하길 바란다.

표 3. 일반적인 고조파 지수들

명칭	정의
전고조파왜곡(THD)	$\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{50} U_n^2\right)} / U_1$
인덕턴스에 적용된 전고조파 왜곡(THD _{ind})	$\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_n^2}{n^\alpha}\right)\right)} / U_1$ $\alpha=1 \dots 2$
캐패시터에 적용된 전고조파 왜곡(THD _{cap})	$\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{50} (n \times U_n^2)\right)} / U_1$
총수요왜곡(TDD)	$\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{50} I_n^2\right)} / I_{rated}$
총내부고조파왜곡(TIHD)	$\sqrt{\sum_{i=1}^n V_i^2} / V_1$ $n=$ 고려된 내부고조파의 총 수
전압 불평형	평균 상전압에 대한 최대편차 / 평균 상전압 역상분(or 영상분) 전압 / 정상분 전압

4. 배전계통에서의 전력신뢰도 평가 방식

배전계통에 보편적으로 적용되는 '신뢰도'의 의미는 수용가에 대한 전력공급의 지속성을 의미한다. 신뢰성 있는 전력계통은 정전 없는 전력을 공급하는 것이다. 배전계통의 신뢰도 해석에 있어서의 가장 중요한 차이점의 하나는 단전(outage)과 정전(interruption)이라는 두 단어의 차이점이다. 그것들은 매우 다른 의미를 가지며 '단전(outage)'은 전력공급 계통의 어떤 부분의 완벽한 고장(변압기 사고, 선로

의 분리 등)을 의미하며 ‘정전(interruption)’은 일반적으로 단전에 기인한 하나 이상의 수용가들의 전력공급의 중단을 의미한다.

신뢰도 해석에는 두 가지 측면이 있으며 그것은 정전의 빈도(frequency)와 지속시간(duration)이다. 따라서, 신뢰도 평가는 단전(outage)에 의한 정전(interruption)의 빈도와 지속시간을 평가하는 것이다. 다시 말해서, 얼마나 많은 수용가들이 얼마나 오랫동안 계통내부의 설비나 특정 부분에서의 단전에 의해 정전을 경험하는가 하는 것이 배전계통 신뢰도 평가의 핵심이다. 이것은 배전계통의 레이아웃(layout)에 의해 절대적인 영향을 받는다. 배전계통의 레이아웃이란, 기본적인 계통의 선로 형태와 구성 설비의 특성을 포함한 전반적인 배전 계통을 의미한다. 따라서, 배전계통에서의 신뢰도 해석에서는 다음과 같은 변수들이 존재한다.

1) 계통의 구성(topology): 피더(feeder), 간선(lateral) 및 분기선(tap)의 길이, 위치 및 수용가의 위치, 선로 각 부의 설비 종류 및 위치 등

2) 계통 사고율(failure rate): 피더(feeder), 간선(lateral) 및 분기선(tap)의 사고율 차이, 선로 각 부의 설비의 사고율 등(일반적으로는 배전 계통에 대해서는 선로 사고율이 동일한 것으로 처리하는 것이 일반적임[20]).

3) 계통 보호기기 및 사고 복구기기들의 동작 특성: 보호기기의 동작 특성(재폐로의 수행 여부 등)과 사고 복구를 위한 개폐기의 동작 속도 및 특성, 배전자동화의 수행 여부 및 최근에 배전 계통에 적용되는 STS(static transfer switch)나 SSTS(solid state transfer switch) 등[22,23]의 고속절환 개폐기의 설치 여부 및 위치.

4) 정전의 지속시간에 대한 정의: 일반적으로 전력회사마다 수용가 부하의 특성을 고려하여 각기 다른 정전의 지속시간과 크기에 대한 정의를 내리고 있으며 이 정의 값에 따라 실제적으로 동일한 계통에 대한 평가의 결과도 많은 차이를 보일 수 있음. 국내의 경우 5분을 정전 지속시간의 경계[24]로 하고 있으나, 국외의 경우 참고문헌 [2] 및 [3]에 나타나 있는 것처럼 1분이나 2분을 그 기준으로 사용하고 있음.

5) 계획 정전과 불시 정전의 포함 여부: 수용가에 발생하는 정전은 크게 계획 정전(scheduled interruption)과 불시 정전(forced interruption)의 두 가지로 구분됨. 많은 전력회사에서는 신뢰도 보고에 계획된 정전이나 계통 사고에 관계되지 않은 정전을 제외하며 이러한 것들은 종종 정전 통계에 혼란을 가져오기도 함.

4.1 기본 신뢰도 지수

배전 신뢰도 지수들은 크게 빈도와 지속시간으로 나타나며 두 가지를 모두 포함하는 해석 지수는 거의 없다. 신뢰도 해석에 있어서 가장 많이 사용되는 4개의 지수들은 수용가의 크기를 분류하지는 않는다. 이 지수들은 수용가들의 최대 전력, 사용 에너지 및 등급 등은 무시한다. 이러한 지수에는 시스템 평균 정전 빈도 지수(system average interruption frequency index: SAIFI)와 수용가 평균 정전

빈도 지수(customer average interruption frequency index: CAIFI) 등의 정전 빈도에 관련된 것과 시스템 평균 정전 지속시간 지수(system average interruption duration index: SAIDI) 및 수용가 평균 정전 지속시간 지수(customer total average interruption duration index: CTAIDI) 등의 지속시간에 관련된 것들이 있으며 이 4가지 신뢰도 평가 지수를 기본 신뢰도 지수(basic reliability index)[25,26]라고 하며 식 (8)에서 (11)까지에 나타내었다. 일반적으로 이러한 4가지는 서로 결합되어 사용되며 평가의 기간은 일반적으로 월(month)이나 연(year) 단위이다. 모든 수용가 정전은 1개의 수용가로 지수에 반영되며 어떤 수용가에 3회 정전이 발생했다면 정전을 경험한 수용가 3개로 계산한다. 또한, 1개 설비의 사고로 인해 3개 수용가가 정전되었다면 이것 역시 정전을 경험한 수용가 3개로 계산한다.

$$SAIFI = \frac{\text{정전 경험한 수용가 수}}{\text{계통내의 총 수용가 수}} \quad (8)$$

$$CAIFI = \frac{\text{정전 경험한 수용가 수}}{\text{적어도 한번이라도 정전경험한 수용가 수}} \quad (9)$$

$$SAIDI = \frac{\text{모든 수용가 정전지속시간의 합}}{\text{계통내의 총 수용가 수}} \quad (10)$$

$$CTAIDI = \frac{\text{모든 수용가 정전지속시간의 합}}{\text{적어도 한번이라도 정전경험한 수용가 수}} \quad (11)$$

4.2 부하 삭감 지수(Load Curtailment Index)

기본 신뢰도 지수에 부가적으로 적은 용량의 부하의 정전에 비해 대용량 부하의 정전에 가중치를 주기 위한 수용가 부하의 크기에 관련된 신뢰도 지수들이다. 이러한 지수들은 정전의 용량-시간 관계를 가지고 작성되며 수용가 평균 부하 삭감 지수(customer average load curtailment index: CALCI)가 있으며 식 (12)에 나타내었다. 여기서 load curtailment는 정전의 지속시간과 정전을 경험한 부하의 용량[kVA]을 곱하여 계산한다.

$$CALCI = \frac{\text{모든 수용가 Load Curtailment의 합}}{\text{적어도 한번이라도 정전을 경험한 수용가 수}} \quad (12)$$

4.3 최악의 경우의 지수(Worst Case Indices)

시스템이 전반적으로 훌륭한 신뢰도를 가지고 있다고 할지라도 최악의 경우에 해당되는 수용가는 전혀 다른 신뢰도를 유지할 수도 있다. 따라서, 몇몇 전력회사에서는 이러한 최악의 경우를 기록하고 해당 계통의 평가에 이용하기도 한다. 이의 대표적인 것으로는 특정 기간동안에 최대의 정전횟수를 경험한 수용가에 대한 정전빈도를 평가하는 최대 개별 수용가 정전 빈도(maximum individual customer interruption frequency: MICIF)와 특정 기간동안에 최대의 정전 지속시간을 경험한 수용가에 대한 정전지속시간을 평가하는 최대 개별 수용가 정전 지속시간(maximum individual customer interruption duration: MICID)가 있다.



4.4 신뢰도 지수의 이용

SAIDI와 CTAIDI에 의해 주어진 지속시간과 SAIFI, MAIFI 및 CAIFI에 의해 주어진 정전빈도는 신뢰도의 매우 다른 측면으로 정전빈도는 얼마나 자주 사고가 발생하는가를 측정한다. 일반적으로 배전계통의 설계에서는 지속시간이 아닌 빈도에 관련되는 요소들인 전반적인 계통의 레이아웃에 관심을 가지게 된다. 반면, SAIDI 및 CTAIDI 및 지속시간의 지수들은 일반적으로 배전계통 및 설비들의 조건의 수단은 아니며 단지 그것들은 사고가 발생했을 때 얼마나 빨리 전력을 복구시킬 것인가에 달려있기 때문이다. 따라서, SAIDI 및 CTAIDI등을 줄이는 조치들은 SAIFI 및 CAIFI를 삭감시키는 것과는 별개이다.

CAIFI 및 CTAIDI는 표면상으로는 SAIFI 및 SAIDI와 유사하다. 이러한 두 개의 통계들의 중요 포인트는 얼마나 고르게 배전계통 전체에 사고가 분포하는가와 얼마나 집중적으로 몇몇 지역에 그것이 집중되는가하는 것을 구별하는 것이다. 중요한 것은, CAIFI 대 SAIFI와 CTAIDI 대 SAIDI의 비는 식 (13)과 같이 같으며 따라서, CTAIDI 대 SAIDI는 CAIFI 대 SAIFI 이상의 정보를 제공하지 못하므로 전력회사에서는 SAIFI, SAIDI 및 CTAIDI나 CAIFI중의 어느 하나의 3개 평가지수를 사용하는 것이 일반적이다.

$$\frac{CTAIDI}{SAIDI} = \frac{CTIFI}{SAIFI} = \text{적어도 한번 정전을 경험한 수용가 수} \quad (13)$$

5. 결 론

이제까지, 배전계통에서의 전력품질 및 신뢰도의 평가 방식을 정리해보았다. 본 문에서는 평가를 위한 방법론보다는 평가 지표를 위주로 소개하였으며 방법론적인 면은 여타의 논문 및 참고문헌을 참조하길 바란다.

배전계통의 전력품질 평가는 가시적인 수용가 영향의 우선도에 의해 전압품질 분야에 집중되고 있는 것이 사실이다. 그러나, 갈수록 심각해지는 비선형 수용가 부하의 증대는 파형의 왜곡에 대한 전력품질 분야의 평가 지표 수립 문제의 중요성을 증대시키고 있는 것 또한 주지의 사실이다. 그러나, 아직까지 대부분의 전력품질 평가는 전력회사 위주로 시행되고 있으며 수용가에 대한 직접적 영향을 평가하기 위한 방법은 아직까지 제시되지 않고 있다. 또한, 배전계통의 신뢰도 평가에 있어 정전 지속시간의 정의에 따른 신뢰도 평가에의 포함 여부는 사실상 지속시간에 의한 정의는 사실상 수용가에 대해서는 아무 의미가 없을 수가 있다. 매우 짧은 정전이라 할지라도 수용가에 있어서는 그저 정전일 뿐이기 때문이다. 또한, 신뢰도 지수를 이용한 평가의 결과를 비교하는데 있어서 기본 신뢰도 지수의 정전 지속시간과 빈도의 대소를 비교하는 문제(1시간 정전 2회와 2시간 정전 1회는 동일한 크기로 해석되는가?)도 아직까지 명확한 정의가 제시되지 않고 있다.

그러나, 언급한 많은 문제점에도 불구하고 수용가의 지속적인 전력품질 및 신뢰도 향상 요구 때문에 현재 많은 전력회사에서는 이와 같은 전력품질과 전력신뢰도 평가 지표를 이용하여 자사의 배전계통을 평가하여 향상된 전력공급 서비스를 위한 방안을 마련하고 있다. 국내의 경우 최근의 전력산업 구조개편 등의 배전 계통의 변화움직임을 시발점으로 학계와 전력회사를 중심으로 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 배전계통에서의 전력품질 및 신뢰도 평가 방안의 수립은 이제까지의 계통해석 전반에 걸친 표준 제정, 평가 지표 수립, 이론적 해석 및 실증적 해석 등을 수반해야 하므로 특정 기관에 의한 문제의 해결을 기대하기는 힘들 것이다. 따라서, 학계 및 연구소 등과 전력회사의 실무자들이 공동으로 협력하여 서로간의 정보와 연구 결과를 공유하려는 의지가 어느 때보다 절실하다 생각된다.

참고문헌

- [1] IEEE Std. 1100-1992, IEEE recommended practice for powering and grounding sensitive electronic equipment.
- [2] IEEE Std. 1159-1995, IEEE recommended practice for monitoring electric power quality.
- [3] IEEE Std. 1250-1995, IEEE guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbance.
- [4] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan and H. W. Beaty, Electrical power systems quality, McGraw-Hill, 1996.
- [5] Math H. J. Bollen, Understanding power quality problems - voltage sags and interruptions, IEEE Press, 2000.
- [6] IEC 61000-1-1, Electromagnetic compatibility (EMC), Part 1: General, Section 1: Application and interpretation of fundamental definitions and terms.
- [7] ANSI/IEEE Standard 446-1987, IEEE recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications(IEEE Orange Book).
- [8] J. Arrillaga, N. R. Watson and S. Chen, Power system quality assessment, Wiley & Sons, 2000.
- [9] W. E. Reid, "Power quality issues - standards and guidelines," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 3, pp. 625-632, May/June 1996.
- [10] T. S. Key, "Diagnosing power-quality related computer problems," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 15, no. 4, pp. 381-393, July 1979.
- [11] L. E. Conrad et al., "Proposed chapter9 for predicting voltage sags(dip) in revision to IEEE Std 493, the Gold Book," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 3, pp. 805-821, May/June 1994.
- [12] Math H. J. Bollen, "Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems," IEEE Trans.

- on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1414-1423, May/June 1994.
- [13] Math H. J. Bollen, T. Tayjasanant and G. Yalcinkaya, "Assessment of the number of voltage sag experienced by a large industrial customer," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 33, no. 6, pp. 1465-1471, November/December 1997.
- [14] G. T. Heydt, "Electric power quality: A tutorial introduction," IEEE Computer Applications in Power, pp. 15-19, January 1998.
- [15] Y. Sekine and T. Yamamoto, "Present state of momentary voltage dip interferences and the countermeasures in Japan," Cigre 36-206, pp. 1-5, August 1992.
- [16] J. Lamoree, D. Mueller, P. Vinett, W. Jones, and M. Samotyj, "Voltage sag analysis case studies," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 4, pp. 1083-1089, July/August 1994.
- [17] S. Y. Yun, J. H. Oh, S. J. Rim and J. C. Kim, "An enhanced method for assessing the effect of voltage sag in power distribution system," Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 518-523, July 1999.
- [18] R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Charistie, S. S. Venkata and R. Fletcher, "distribution system reliability assessment momentary interruptions and storms," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 4, pp. 1569-1575, October 1997.
- [19] R. C. Dugan, D. L. Brooks, M. Wacławiak, and A. Sundaram, "Indices for assessing utility distribution system RMS variation performance," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 1, pp. 254-259, January 1998.
- [20] R. Billinton and W. Li, Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo Methods, Plenum Press, 1994.
- [21] G. T. Heydt and W. T. Jewell, "Pitfalls of electric power quality indices," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, no. 2, pp. 570-578, April 1998.
- [22] J. E. Jipping and W. E. Carter, "Application and experience with a 15kV Static Transfer Switch," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 14, no. 4, pp. 1477-1481, October 1999.
- [23] 윤상윤, 오정환, 김재철, "부하 절환 스위칭을 이용한 방사상 배전계통에서의 순간전압강하 대책," 대한전기학회 논문지, 제 49A권, 제 11호, pp.558-565, 2000년 11월.
- [24] 한국전력공사 전력연구원, 송배전 재폐로 방식의 최적화 연구, 한국전력공사, 1997년 12월.
- [25] H. Lee Willis, Power distribution planning reference book, Marcel Dekker, Inc., 1997.
- [26] James J. Burke, Power distribution engineering - fundamentals and applications, Marcel Dekker, Inc., 1994.

저 자 소개



김재철 (金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 송실대 전기공학과 졸업(학사). 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988~현재 송실대 공대 전기공학과 교수.



윤상윤 (尹尙潤)

1970년 8월 28일 생. 1996년 송실대 전기공학과 졸업(학사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 송실대 대학원 전기공학과 박사과정.