

전력품질 모니터링 및 알고리즘에 관한 연구

원동준*, 정일엽*, 김중문*, 문승일*, 서장철[§], 최종용[§]
 *서울대학교 전기컴퓨터공학부, [§](주)LG산전

A Study on the Power Quality Monitoring and Its Algorithm

D.J. Won, I.Y. Chung, J.M. Kim, S.I. Moon, J.C. Seo, J.W. Choi
 Seoul National University, LG Industrial Systems

Abstract - 최근 정보통신산업의 발전에 따른 첨단 정보통신기기의 사용증가와 정밀제어기기, 연속공정기기의 증가는 이전의 고전적인 품질규제나 신뢰도 규정보다 더욱 엄격한 전력품질 관리기준을 요구하고 있으며, 또한 전력산업구조개편을 통한 경쟁체제 도입은 전력품질을 기반으로 한 전력거래와 계약을 요구하고 있다. 본 논문에서는 이러한 전력품질을 측정하기 위한 계측 장비들의 최근 기술 동향 및 새롭게 대두되고 있는 전력품질 모니터링 및 알고리즘에 대해 살펴본다. IEEE 1159표준을 중심으로 한 전력품질 표준에 대해 살펴보고 이를 측정하기 위한 소프트웨어와 알고리즘을 분석하도록 한다. 마지막으로 현재 (주)LG산전이 공동 개발하고 있는 전력품질 분석시스템과 소프트웨어의 구조와 기능에 대해 살펴보기로 한다.

1. 서 론

지금까지 전력시스템에서 전력품질은 정전시간, 전압적정률, 주파수유지율 등의 목표관리에 의해 적정 전력품질을 유지하는 것을 뜻하였다. 그러나 최근 정보통신기기, 정밀제어기기 등의 사용이 증가하면서 전력 사용가들은 민감한 장비나 프로세스의 올바른 동작을 위해 점점 더 높은 수준의 전력품질을 요구하고 있다. 주로 분(Minute) 단위 이상에서 정의되는 신뢰도와는 달리 전력품질은 전압 sag나 swell과 같이 몇 주거나 수 초 사이의 매우 짧은 순간의 이벤트를 다룬다. 순간전압변동(sag, swell), 고조파(Harmonics), 전압불평형(Unbalance), 순간정전(Interruption), 과도전압변동(Transient), 플리커(Flicker) 등과 같은 새로운 개념의 전력품질은 아직까지 정확한 측정 및 평가가 이루어지지 않아 피해내역을 파악하기가 어려울 뿐 아니라 구체적인 개선 대책도 마련되어 있지 않은 실정이다. 따라서 먼저 전력품질을 모니터링하여 전력품질을 분석, 진단하는 것이 점차 그 중요성을 더해가고 있다.

한편 우리나라에서 진행되고 있는 전력산업구조개편은 기본적으로 경쟁(Competition)을 전제로 하게 되며, 각자 자신의 이해와 요구에 따라 계약(Contract)을 맺게 된다. 이러한 계약의 내용이 되는 전력은 지금까지 일방적으로 공급하고 소비하는 대상에서 일정한 가격(Price)과 질(Quality)을 가진 상품(Product)으로 변화하게 된다. 이렇게 상품으로 거래되는 전력의 품질측정을 위해서 전력품질 모니터링 시스템은 반드시 먼저 설치되어야만 한다. 또한 구조개편 이후 전력품질 분야에서 대두될 중요한 문제점은 장비 점검과 새로운 투자가 부족해진다는 점이다. 이러한 경향은 전력품질을 저하시킬 뿐만 아니라 전력시스템의 안전한 운전을 위한 운전 여유를 감소시켜 대규모의 전력시스템 붕괴를 초래할 수도 있다. 또한 구조개편이 되더라도 사고는 이전과 똑같이 일어나지만 그에 따른 책임소재를 따지는 문제는 이전보다 훨씬 복잡하게 전개된다. 그리고 경쟁으로 인한 정보의 공유의 제한으로 인해 서로 협조적인 제어가 어려워지는 문제도 또한 발생한다[1].

이러한 전력품질 문제는 산업용과 상업용 수용자에게 많은 비용문제를 일으킨다. 그 결과들이 참고문헌 [2]에 보고되어 있다. 약 30%의 순간 전압 강하가 프로그램 가능한 제어기를 초기화시킨다고 하며, 정지된 시스템을 다시 가동시키는데 약 \$50,000의 비용을 든다고 한다. 연속공정을 가지는 유리공장에서 5주기의 길이를 가지는 전압 강하가 발생하면 약 \$200,000의 손실이 발생하고, 컴퓨터 센터의 2초간의 정전 사고는 약 \$600,000의 손실을 야기한다. 이와 같이 전력품질과 관련된 상품과 서비스는 1998년에 미국에서만 약 수십억 달러에 달하는 것으로 추정되고 있으며 낮은 전력품질로 인한 연간 손실액은 약 133억\$에 이르는 것으로 추정되고 있다[3].

이와 같은 낮은 전력품질로 인한 손실들을 해결하기 위해서 필요한 전력품질 관련 시스템은 크게 3가지 단계로 구분할 수 있다. 첫째, 전력품질을 측정, 분석할 수 있는 전력품질 모니터링 시스템, 둘째, 분석된 결과에 기반하여 전력품질 문제의 원인 및 사고 파급 영향 분석 등을 수행하는 전력품질 진단 시스템, 셋째, 전력품질 진단 결과를 바탕으로 전력품질을 향상시킬 수 있는 최적의 방법을 제시하고 보상장치를 설치·운영하는 전력품질 향상 시스템이 그것이다. 본 논문에서는 이러한 세 가지 시스템 중에서 가장 선행되어야 할 시스템인 전력품질 모니터링 시스템에 대해 분석하도록 한다.

2. 본 론

2.1 전력품질 모니터링

서론에서 언급했듯이 전력품질의 문제의 해결의 첫 번째 관문은 전력품질을 측정하는 것이다. 그런데 여기서 전력품질 측정을 그 목적에 따라 세분화해서 나누어보면 다음의 세 가지로 나눌 수 있다.

표 1. 전력품질 측정 장비의 목적에 따른 분류

분류	측정목적	주요변수
Meter	instantaneous	전압, 전류, 전력
Analyzer	periodic	전압, 전류, 전력 역률, 고조파, 파형검처
Monitor	continual	전압, 전류, 전력 주기별 연산 데이터

위 표에서 볼 수 있듯이, 측정 장비를 구분하는 가장 커다란 특징은 측정목적이다. Meter는 원하는 지점의 순간적인 값을 측정하려는 목적으로 쓰이며, 운반이 가능하고 자체 디스플레이 기능을 가지는 장비이다. Analyzer는 주기적으로 변동하는 값들을 측정하기 위한 전력품질 측정장비로서, 주로 주파수영역에서의 고조

파 분석이나 파형 캡처와 같은 기능을 수행하게 된다. 또한 Monitor는 전력품질을 측정하고자 하는 위치에 고정형으로 설치하여 그 위치의 전력품질을 주기별로 측정하고 연산하여 평균 데이터뿐만 아니라 순간적인 변동들까지 측정하는 장비라고 할 수 있다.

전력품질 측정 장비는 점차 미터에서 모니터로 변화해 나가는 추세이다. 전력품질이 경제적인 문제 즉, 전력품질에 기반한 계약과 관련되면서 일시적인 측정을 통한 평균값 등의 추출보다는 긴 시간동안의 연속적인 측정을 통한 측정지점에서의 전력품질 통계가 더욱 유용한 자료로 사용되기 때문이다.

2.2 전력품질 분류 표준

표 2에 전력품질 국제표준인 IEEE 1159에 제시되어 있는 전력품질 측정 항목들을 요약, 정리하였다.

표 2. IEEE 1159에 의한 전력품질 분류

분류	종류	비고
Transients	Impulsive	5ns~0.1ms rise
	Oscillatory	~5Mhz
Short-duration variations	Interruption	0.5cycles~1min, ~0.1pu
	Sag	0.5cycles~1min, 0.1~0.9pu
	Swell	0.5cycles~1min, 1.1~1.8pu
Long-duration variation	Interruption, sustained	1min~, 0.0pu
	Undervoltages	1min~, 0.8~0.9pu
	Overvoltages	1min~, 1.1~1.2pu
Voltage imbalance		0.5~2%
Waveform distortion	DC offset	0~0.1%
	Harmonics	0~20%
	Interharmonics	0~2%
	Notching	
	Noise	0~1%
Voltage fluctuation		~25Hz, 0.1~7%
Power frequency variations		~10s

각 항목들은 IEC에 제시되어 있는 표준들과 거의 비슷하고 용어상에서 약간의 차이를 보이는 경우가 있다. 예를 들어 sag는 IEC 표준에서는 dig로 표현되어 있다. 각 현상들은 정상상태와 비정상상태의 현상으로 나눌 수 있고, 또 시간 영역에서의 현상과 주파수 영역에서의 현상으로 나눌 수 있다. 세부적인 사항들은 참고 문헌[4][5][6]들을 참고하기 바란다.

위의 현상들은 고려해야 할 요소들을 통해 잘 설명될 수 있다. 위의 현상들에서 정상상태의 현상에 대해서는 Amplitude, 주파수, 스펙트럼, Modulation, Source impedance, Notch depth, Notch area 등이 고려될 수 있으며, 정상상태가 아닌 현상에 대해서는 Rate of rise, Duration, Rate of occurrence, Energy potential, Source impedance 등이 고려될 수 있다.

2.3 모니터링 기술 동향

현재 개발되어 출시된 전력품질 측정장비들을 그 발전 단계에 따라 나누어 보면 크게 기존의 전력량계 혹은 디지털 보호계전기에 전력품질 분석 기능을 추가한 제 1세대형과 전력품질 표준에 맞는 항목들을 전문적으로 다루는 제 2세대형으로 나눌 수 있다. 제 1세대형 제품들은

은 주로 전력 및 전력량 등의 고전적인 요소에 과전압(Overvoltage), 저전압(Undervoltage), 정전(Interruption)등과 같은 보호계전 파라미터 그리고 고조파 분석(Harmonic analysis)기능 등을 추가한 것들이 대부분이며 이러한 기능들은 디지털 전력량계나 디지털 보호계전기에 옵션 형태로 제공되고 있다. 제 2세대형 제품들은 대부분 IEEE나 IEC의 전력품질 표준을 따르며 자체 디스플레이를 통해 전력품질 분석 결과를 보여주기도 하고 또는 직렬 통신을 통해 컴퓨터 상에서 결과를 나타내기도 한다. 이들은 주로 운반이 가능한 형태로 제작되어 측정하고자 하는 지점의 전력 품질을 측정, 저장하여 이 데이터를 추후 분석에 이용한다.

이와 더불어 최근에는 2.1절에서 언급한 바와 같이 한 지점의 전력 품질을 끊김이 없이 연속적으로 측정하여 그 지점의 전력 품질 통계를 내는 모니터 개념으로 전력 품질 측정장비가 발전하고 있는 추세이다. 이러한 제 3세대형 제품들은 인터넷 네트워크를 통한 고속 통신, 연속 측정을 통한 통계 분석, 웹브라우저를 통한 디스플레이 기능 등을 제공하거나 제공할 예정으로 있으며 점차 전력품질 진단 시스템으로 그 범위를 넓혀 갈 계획으로 있다.

표 3. 전력품질 측정 장비의 기능별 분류

	주요 기능	제조사
제 1세대	전력요소 중심 + 전력품질 옵션	GE, ABB
제 2세대	전력품질 중심	BMI, Alstom, Siemens, Ametek
제 3세대	고속통신, 통계분석, 웹브라우징	BMI, RPM

2.4 모니터링 알고리즘

전력 품질에 영향을 주는 것은 크게 순간적으로 전압이나 전류가 변동하는 것(disturbance)과 비교적 긴 시간동안에 전압이나 전류의 파형에 변동이 발생하거나 저주파의 노이즈가 발생하는 것(steady state variation)으로 구분 지어 생각할 수 있다. 순시 전압 변동(Sag, Swell, Interruption) 및 과도상태 전압이 전자에 속하며 고조파, 플리커(Flicker) 및 과전압(Overvoltage)과 저전압(Under voltage)이 후자에 속한다.

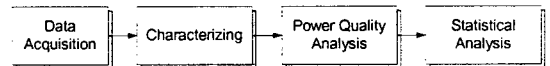


그림 1. 전력품질 측정을 위한 흐름도

전력 품질을 측정하는 과정은 그림 1에 도시한 바와 같다. 3상과 중성선 등 선로의 전압, 전류를 측정하여 디지털 신호로 바꾸어 주는 과정(Data Acquisition), 디지털 신호로부터 다양한 신호 처리 알고리즘을 통해 전압, 전류의 RMS 값, 고조파 성분, 그리고 주파수 등 기본적인 데이터를 측정하는 과정(Characterizing), 측정된 기본 데이터를 분석하여 전력품질 이벤트를 감지하는 과정(Power Quality Analysis) 그리고 전력품질 이벤트와 저장된 사고 파형을 통계적으로 분석하는 과정(Statistical Analysis)으로 구성된다.

선로의 전압, 전류를 디지털 신호로 바꾸어 주기 위해서는 A/D 변환기를 사용하며 이때의 샘플링 주파수와 분해도(resolution)에 따라 측정하는 값의 정밀도가 정해진다. 50차 고조파 성분까지 측정 가능하려면 최소한 주기 당 100번, 즉 6kHz 이상의 샘플링 주파수로 측정해야 한다. BMI사 등 현재 출시되고 있는 대부분의

고성능 전력 품질 측정기는 2진 고속 푸리에 변환(FFT)을 사용하고 효과적인 고주파 필터링을 위해 주기 당 128번, 즉 7.68kHz의 샘플링 주파수로 데이터를 수집하고 있으며 분해도는 12~16bit 정도를 사용하고 있다.

A/D 변환된 신호를 받아서 기본적인 값들을 측정하고 이를 이용하여 전력 품질에 영향을 주는 이벤트들을 측정하는 과정을 그림 2에 도식화하였다.

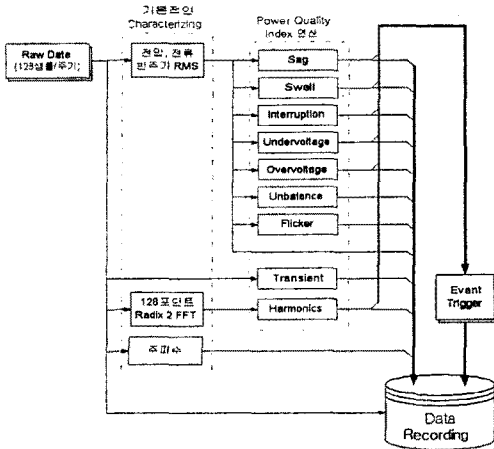


그림 2. 전력품질 측정 알고리즘 개요도

먼저 전압, 전류의 RMS 값을 매 반주기마다 측정하여 기준 전압의 크기보다 줄어들거나 감소하는 경우 사고 지속 시간에 따라 순시 전압 상승(Swell), 순시 전압 강하(Sag), 순간 정전, 과전압 그리고 저전압으로 분리하여 사고종류, 사고기간, 사고크기, 시작시간과 종료시간, 그리고 평균 전압 등을 계산한다. 불평형의 경우는 불평형 지수를, 플리커의 경우는 10분과 2시간 간격으로 지수를 계산한다. 고조파 연산에는 128포인트 2진 고속 푸리에 변환을 통해 기본파의 정수배에 해당하는 고조파의 크기와 위상을 측정하며 이를 이용해서 전 고조파왜율(THD), 전우수고조파왜율(TEHD), 전기수고조파왜율(TOHD), 왜곡률(DF), 변위율(DPF), 역률(PF) 등을 측정하며 특별히 전류에 대해서는 전수요왜곡(TDD)과 K-factor를 구한다. 주파수는 전력시스템의 공급과 수요의 균형을 판단할 수 있는 기준이며 사고등을 판별하는 수단이므로 매주기마다 정확하게 측정한다.

표 4. 전력품질 측정 데이터

이벤트 종류	발생원인	측정 데이터
순시 전압 변동 (Sag, Swell)	인근 선로 사고	횟수, 종류, 기간, 크기 시작시간, 종료시간, 평균전압
순간 정전 (Interruption)	보호회로 동작	횟수, 종류, 기간, 크기 시작시간, 종료시간, 평균전압
과전압, 저전압 (Undervoltage, Overvoltage)	전동기 구동 부하 변동	횟수, 종류, 기간, 크기 시작시간, 종료시간, 평균전압
전압불평형	부하 불평형	불평형 지수
플리커 (Flicker)	전동기 구동 아크로	Pst, Plt
고조파 (Harmonics)	비선형 부하 시스템 공진	THD, TEHD, TOHD TDD, K-factor

이 알고리즘을 이용하여 고조파 분석을 한 결과가 그림 3과 4에 나타나 있다. 그림 3은 고조파가 섞인 전류 파형이고 그림 4는 이를 분석한 결과를 나타낸 것이다.

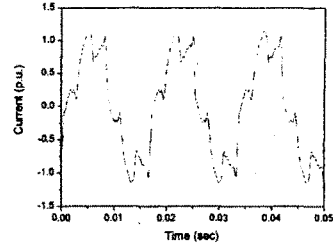


그림 3. 고조파가 섞인 전류 파형

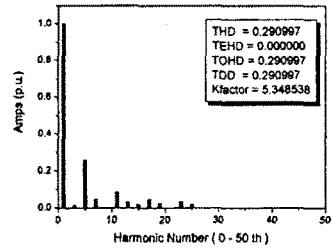


그림 4. 고조파 분석 결과

3. 결 론

전력품질 문제가 점점 중요하게 대두되면서, 전력품질 측정장비도 점차 일시적인 데이터를 측정하는 미터에서 연속적인 데이터를 측정, 분석하는 모니터링 개념으로 발전하고 있다. 이러한 전력품질 모니터는 IEEE 1159와 같은 국제 표준을 따라 이벤트를 분류하고 데이터를 분석한다. 최근에는 이와 같은 기능에 고속 통신, 연속 측정 및 분석, 웹 브라우징 등의 기능을 추가로 지니는 더욱 진보한 모니터들이 등장하고 있으며 이와 같은 모니터들의 등장으로 전력 시스템의 전력품질은 더욱 정밀하게 측정, 분석되고 있다.

본 논문에서는 이러한 전력품질 모니터링 시스템에 탑재되는 모니터링 알고리즘을 IEEE 1159 표준에 따라 분류하고 그 특징을 분석하였으며 이를 구현하여 고조파 분석을 시행하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jos Arrillaga, Math H.J.Bollen, Neville R. Watson, "Power Quality Following Deregulation," Invited paper, Proceedings of the IEEE, Vol.88, No.2, pp.246~261, February 2000
- [2] J.Douglas, "Solving problems of power quality," in EPRI journal, vol. 18, no.8, pp.6-15, Dec. 1993
- [3] A.M.Gaouda, M.M.A.Salama, M.R.Sultan, "Automated Recognition System for classifying and quantifying the electric power quality," Proceedings of 8th International Conference On harmonics and Quality of Power, vol. 1, pp. 244-248, 1998
- [4] J.Arrillaga, N.R.Watson, S.Chen, "Power system quality assessment", John Wiley & Sons Ltd., 2000
- [5] Math H.J.Bollen, Understanding power quality problems, IEEE Press, 2000
- [6] Christopher J. Melhorn, Mark F. McGranaghan, "Interpretation and analysis of power quality measurements," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 31, issue 6, pp. 1363 -1370, Nov.-Dec. 1995