2006년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2006. 7. 12 - 14

통계적 방법을 이용한 전력품질 관리방안

조수환, 장길수, 권세혁, 박상호*, 전영수*, 곽노홍*
고려대학교 전기전자전파공학부, 한국전력연구원*

Applicability of Statistical Evaluation to Power Quality Analysis

Soo-Hwan Cho, Gilsoo Jang, Sae-Hyuk Kwon, Sang-Ho Park*, Young-Soo Jeon*, No-Hong Kwak*
Electrical Engineering Department of Korea University, Korea Electrical Power Research Institute (KEPRI)*

Abstract - The installations of power quality monitoring system have increased drastically over the past several decades. These systems have been effectively used to monitor, analyze and diagnose the conditions of power system, and furthermore can be used to improve the present asset maintenance policy, scheduled (time-based) method, into the advanced, cost-effective and labor-effective maintenance methods, such as condition-based maintenance, predictive maintenance and reliability centered maintenance. As an approach to this, this paper introduces the statistical methods, three kinds of control charts (Shewhart chart, CUSUM chart and EWMA chart), and discusses the applicability of these methods to recognize the changing trends of power quality indices and to estimate the system's condition, using Matlab.

1. 서 론

산업 전방에 걸쳐 유지보수의 효율을 증대시키기 위한 여러 가지 노력이 시도되고 있으며 전력계통 분야에도 새로운 유지관리기법의 도입이 시도되고 있다. 초기 산업 사회에서는 기존 설비들의 유지보수보다는 신설에 역점을 두고 규모의 성장을 거듭하게 되었다. 시간이 지남에 따라 설비들이 고장을 일으키게 되었고 주로 사고장비의 교체를 위주로 보수가 이뤄지게 되었다.(사고후 보수) 하지만 설비의 고장에 의한 사고여파는 계통의 규모가 커짐에 따라 점차 무시할 수 없을 정도로 증대되었고 설비의 고장을 미연에 방지하는 것이 더욱 강조되면서 설비의 부품들을 정기적인 보수를 통해 수리 혹은 교체하게 되었다.(예방/정기보수, Time-based Maintenance) 이는 사고에 의한 피해보다는 훨씬 유리하지만 부품들의 성능에 관계없이 교체되므로 비용/노동 효율적이지 못한 단점을 지니고 있다. 결국 설비들의 성능을 정확히 파악함으로써 자산을 최대한으로 활용하여 비용과 노동 효율을 극대화할 수 있는 유지보수 방안으로 발전되었다.(예상보수, Condition-based Maintenance) 전력계통 내에서도 최근에 전력품질을 모니터링하기 위한 장비들이 널리 설치되어 사용되고 있으며 이를 통해서 계통과 설비의 상태를 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 결국 전력품질을 기반으로 한 신뢰성중심의 유지보수기법(Power Quality-based, Reliability Centered Maintenance, 이하 PQRCM)의 개발이 연구의 목표라 할 수 있다.

2. 본 론

2.1 전력품질 모니터링 시스템의 이용

기존에 설치되어 있는 전력품질 모니터링 장비로부터 취득된 데이터들은 계통의 신뢰도를 향상시킬 수 있는 다양한 정보를 포함하고 있다. 또한 전력품질은 배전계통내의 건실도, 신뢰도와도 밀접한 관계를 가지고 있으므로 전력품질 데이터를 활용하여 사고 여부를 규명하는 기술은 전력품질 자체를 향상시킴은 물론 계통의 신뢰도 향상에 필수적이라 할 수 있다. 그러므로 현재 설치되어 있는 전력품질 모니터링 시스템을 이용하여 배전 계통내 설비들의 사고를 예측하는 수치적 알고리즘의 구현이 가능하다면 매우 유용할 것이다.

2.2 통계적 방법의 적용 방안

계통에서 취득한 전압/전류로부터 비정상적인 신호의 여부를 판단하기 위해서 사용되는 방법에는 다음과 같은 것이 있다. 첫째, 이상 신호의 직접적인 취득이다. 설비의 노후 및 사고의 진행에 따라 전압 혹은 전류신호에 이상 성분이 첨가된다. 특히 누설 전류의 영향으로 인해 계통의 전류신호에 매우 작은 크기의, 높은 주파수를 갖는 전류 신호의 인지를 통해 이상신호의 유무를 판단할 수 있다. 이러한 정밀한 신호를 정확히 인식하기 위해서는 기본주파수성분 및 저조파성분을 제거해야할 필요가 있다. 이는 아날로그-디지털 변환(Analog-Digital Convertor,이하 ADC)과정에서 비트 해상도를 높이기 위해 필수적이다. 이러한 신호의 추출을 위해서는 다양한 사고에 대한 데이터의 확보가 필수적이며 추후에 계속적인 데이터 취득을 통한 학습의 과정이 필요하게 된다. 둘째, 통계적 방법을 이용한 판단이다. 정상적인 패턴에서 벗어나는 이상 현상을 인식하는 방법으로 주로 컨트롤차트에 의해 구현된다. 주로 고조파와 3상 전압 불평형, 실효치 등 1차적으로 가공된 데이터에 적용할 수 있다.

2.2.1 컨트롤차트(관리도)의 기본

통계적 처리를 이용한 컨트롤차트 기법은 생산 공정관리에 주로 사용되고 있는 기법이다. 생산품들을 통계적으로 평가함으로써 공정을 관리할 수 있다는 사실은 전력품질의 측정을 통해 전력시스템의 상태를 평가가 가능함을 의미한다. 정상적인 상태에서도 공정 내부의 고유잡음 혹은 우연원인이 존재하고 이러한 범위 내에서 시스템이 안정되었을 경우 "통계적 관리하에 있다"라고 하며 이상원인에 의해 공정에 이상이 발생되었을 경우 "관리에서 벗어나다"라고 표현한다.

공정에 대한 통계적 해석은 평균, 분산, 표준편차의 지수로 나타낼 수 있다. 이 데이터를 이용하여 중심선(Center Line, 이하 CL)과 관리상한(Upper Control Limit, 이하 UCL), 관리하한(Lower Control Limit, 이하 LCL)을 설정한 후 이를 컨트롤차트 상에 그려 상태를 평가하는 것이다.

일반적으로 설정되는 CL과 UCL, LCL은 아래와 같다.

$$UCL = \mu_w + L\sigma_w \quad (1)$$
$$Centerline = \mu_w$$
$$LCL = \mu_w - L\sigma_w$$

여기에서 L은 표준편차의 단위로 중심선으로부터 관리상/하한의 거리를 의미한다. 주로 3시그마가 사용되며, 조치선(Action Limit)이라고 한다. 이 관리한계를 넘어갔을 경우 비정상적인 원인이 발생되었음을 의미한다. 때로 2시그마가 사용되기도 하는데 이는 경고한계(Warning Limit)라고 하며 이에 가까워질수록 이상현상이 발생될 가능성이 커짐을 의미한다. [1]

2.2.2 슈왈츠 컨트롤차트(Shewhart Control Chart 혹은 X-bar chart)

연속되는 데이터에 대한 슈왈츠 컨트롤차트는 아래와 같이 작성된다. 일정 개수의 데이터를 과거의 데이터 세트로 하여 평균과 표준편차를 계산한다. 데이터의 개수를 n이라 하면 데이터의 평균과 표준편차는 아래와 같다.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3)$$

관리한계는 다음과 같이 설정한다.

$$UCL = \bar{x} + L\sigma \quad Centerline = \bar{x} \quad LCL = \bar{x} - L\sigma \quad (4)$$

또한 통계처리를 위해 필요한 데이터세트의 개수는 최소 100개로 한다.

2.2.3 누적합계 컨트롤차트(Cumulative Sum Control Chart,이하 CUSUM 컨트롤차트)

CUSUM 컨트롤차트는 입력데이터와 과거 데이터세트의 평균치(목표치)의 차이를 계속적으로 누적 합산한 컨트롤차트로서 연속되는 데이터가 CL의 상단 혹은 하단에 집중적으로 분포될 경우 이를 포착하는데 효율적인 방법이다. CL 근처에 균일하게 분포할 경우 누적합계는 0근처로 관리된다.

누적합계는 아래와 같이 계산된다.

$$C_i = \sum_{j=1}^{i}(x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

2.2.4 지수가중치 컨트롤차트(Exponentially Weighted Moving Average Control Chart, 이하 EWMA컨트롤차트)

EWMA컨트롤차트는 슈왈츠 컨트롤차트에 비해 모니터링하는 값과 평균치와의 차이가 크지 않는 경우(변동이 적은 경우)를 파악하는데 더욱 효율적이다.

EWMA는 아래의 식(6)로 정의된다.

$$
\begin{aligned}
z_i &= \lambda x_i + (1-\lambda) z_{i-1} \\
&= \lambda x_i + (1-\lambda)\left[\lambda x_{i-1} + (1-\lambda) z_{i-2}\right] \\
&= \lambda x_i + \lambda(1-\lambda) x_{i-1} + (1-\lambda)^2 z_{i-2} \\
&= \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1-\lambda)^j x_{i-j} + (1-\lambda)^i z_0
\end{aligned} \qquad (6)
$$

여기에서 λ는 가중치지수 혹은 제동지수라 불리며 0과 1사이의 값을 가지며 0.2~0.3의 값이 가장 많이 사용된다. 초기값은 공정의 목표치($z_0=x_0$)로 결정한다.

측정데이터들의 분산이 σ^2인 경우 z_i의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma^2\left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)\left[1-(1-\lambda)^{2i}\right] \qquad (7)$$

그리고 관리한계는 아래와 같이 설정한다.

$$
\begin{aligned}
UCL &= \bar{x} + L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}\left[1-(1-\lambda)^{2i}\right]} \qquad (8) \\
Centerline &= \mu_0 \\
LCL &= \bar{x} - L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}\left[1-(1-\lambda)^{2i}\right]}
\end{aligned}
$$

하지만 i가 증가할수록 $1-(1-\lambda)^{2i}$는 1에 가까워지므로 결국아래와 같이 근사화될 수 있다.

$$
\begin{aligned}
UCL &= \mu_0 + L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \qquad (9) \\
LCL &= \mu_0 - L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}}
\end{aligned}
$$

2.2.5 그 밖의 컨트롤차트

위에서 언급한 세 가지의 컨트롤차트는 연속적인 데이터를 처리하는 데 용이한 기법들이다. 연속적인 데이터라고 함은 시간의 경과에 따라 그 결과를 숫자로 표현 가능한 경우이며 이를 "정량화 가능하다"라고 한다. 하지만 연속적인 데이터 처리보다 이산적 데이터 처리가 편리한 경우가 있다. 다시 말하면 정량화가 불가능하여 이분법적인 물리량의 사용만이 가능한 경우를 일컫는다. 이는 어떠한 현상의 발생 유무만을 평가하는 것으로 Yes/No 혹은 1/0, 결점(defective)발생/무결점(non-defective), 만족(conforming)/불만족(non-conforming) 등으로 표현된다. 일정 기준을 설정한 후 이 기준을 벗어났느냐 아니면 벗어나지 않았느냐를 판단하여 그 횟수로써 공정의 상태를 평가하는 것이다. 이에 해당하는 컨트롤차트로 다음의 3가지를 소개할 수 있으나 전력품질관리를 위해서는 P차트가 가장 적합하다.

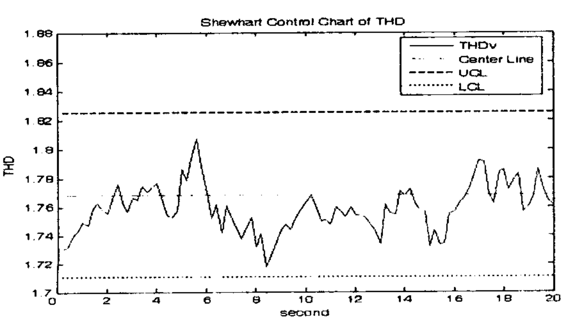
- P 차트 (Control Chart for fraction/proportion of non-conforming) : 불량률 관리도라고 하며 전체 관찰 데이터 중에서 불량이 차지하는 비율을 나타내는 차트
- C 차트 (Control Chart for non-conformities) : 결점수 관리도라고 하며 불량의 개수만을 관리하는 차트
- U 차트 (Control Chart for non-conformities per unit) : 단위당 결점수 관리라고 하며 P차트와 유사하며 단위시간에 입력데이터의 개수가 일정하지 않은 경우에 사용

2.3 사례연구

실제 대덕변전소에서 측정된 40초간의 R상 전압데이터에 대해 고조파(THD)를 계산하여 그 결과값을 가지고 위에서 검토한 두 가지의 컨트롤차트에 적용해보도록 한다.

연속적인 실시간 총고조파왜곡지수(THD)를 계산하기 위해 12싸이클의 직각윈도우를 사용하여 FFT를 수행하였다. 처음의 20초간의 데이터를 기준으로 하여 다음 20초간의 데이터에 대해 컨트롤차트를 작성하였다.

2.3.1 슈왈츠 컨트롤차트



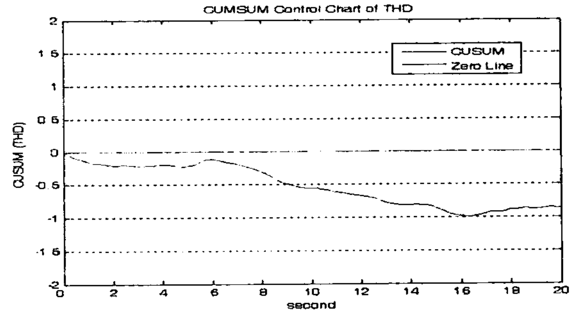
<그림 1> 고조파지수(THD)에 대한 슈왈츠 컨트롤차트

초반 20초 동안 취득된 100개의 THD 데이터를 통해 계산된 평균값은 1.7676이며 표준편차는 0.01915이다. 이를 토대로 작성한 슈왈츠 컨트롤차트는 <그림 1>과 같다.

<그림 1>의 슈왈츠 컨트롤차트를 통해서 전체적으로 대부분의 고조파가 관리한계 내에서 잘 관리되고 있으나, 6초 부근에서 UCL에 근접해 있으며 8초와 15초 부근에서 LCL에 접근하는 경향이 있음을 파악할 수 있다. 그리고 약 8초부터 17초간의 데이터가 CL아래에 형성되어 있음을 알 수 있다. 이를 정확히 해석해보기 위해서 CUSUM 컨트롤차트와 EWMA 컨트롤차트를 작성하여 그 결과를 비교해 보기로 한다.

2.3.2 CUSUM 컨트롤차트

CUSUM 컨트롤차트는 슈왈츠 컨트롤차트나 EWMA 컨트롤차트와는 달리 따로 관리한계를 설정하지 않고 0 근처에서 얼마나 많이 벗어나는 지를 평가하는 것이다. 그 결과를 아래의 <그림 2>에서 확인할 수 있다.

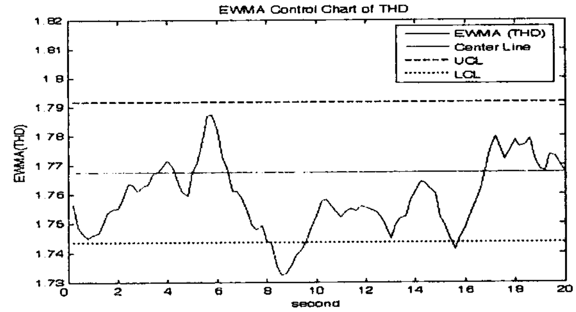


<그림 2> 고조파지수(THD)에 대한 CUSUM 컨트롤차트

다른 2개의 컨트롤차트와는 조금 다른 형태의 컨트롤차트가 보여 지고 있다. 먼저 UCL과 LCL이 차트 상에 나타나지 않고 그 대신 0를 기준으로 데이터들이 아래에 그려지는 것을 확인할 수 있다. CUSUM 컨트롤차트 상에서 그래프가 양의 기울기를 갖는 부분은 슈왈츠 컨트롤차트에서 CL의 상단에 데이터들이 위치하는 경우를 의미하고 음의 기울기를 갖는 부분은 CL의 하단에 데이터들이 위치하고 있음을 말해준다. <그림 2>을 통해 CUSUM이 주로 0의 아래 부분에 분포되어 있으며 대부분이 음의 기울기를 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 슈왈츠 컨트롤차트에서 데이터들이 CL의 하단에 위치하는 경향이 지배적임을 의미한다.

2.3.3 지수가중치(EWMA) 컨트롤차트

EWMA 컨트롤차트의 작성을 위해 $\lambda=0.3$으로 하였으며 EWMA의 초기값으로 처음 20초 동안의 평균값을 사용하였다. 그 결과는 아래의 <그림 3>와 같다.



<그림 3> 고조파지수(THD)에 대한 EWMA 컨트롤차트

위의 <그림 3>를 통해서 슈왈츠 컨트롤차트에서 의심이 가는 세 부분이 명확해질 수 있다. 먼저 UCL에 근접해 있던 6초 부근의 경우 EWMA를 통해서도 잘 관리되고 있음을 알 수 있다. 하지만 8초 부근의 경우 관리를 벗어나있음을 알려주고 있다. 또한 8초부터 15초간의 데이터들이 LCL에 많이 접근해 있으며 그 중 몇 포인트에서 LCL을 벗어나고 있음을 알 수 있다.

결과적으로 CUSUM 컨트롤차트와 EWMA 컨트롤차트는 슈왈츠 컨트롤차트에서 놓칠 수 있는 정보를 더욱 자세히 보여주는 참고적인 역할을 한다. 기존의 품질 지수들이 일정 상태를 유지하고 있음을 파악하는 데는 슈왈츠 컨트롤차트가 주요한 역할을 수행하며 CUSUM 컨트롤차트와 EWMA 컨트롤차트는 참고적인 역할을 수행한다.

오랜 시간 동안의 관찰을 통해 이상 현상의 발생과 컨트롤차트의 패턴 변화 사이의 유사 행동 양식을 파악하는 것 또한 향후 모니터링 시스템에 학습기능을 부여하는데 큰 도움이 될 것이다.

2.4 전력품질을 기반으로 한 신뢰성 중심의 유지보수 방안(PQRCM)

서두에서 언급한 바와 같이 지금까지 살펴본 전력품질 지수에 대한 통계적 관리 기법은 PQRCM의 구현을 위한 방법론으로 사용될 수 있다. RCM이라는 것은 유지보수에 대한 가장 효율적인 접근방안을 결정해주

는 연속적이며 매우 포괄적인 프로세스를 의미한다. 결국 PQRCM은 전력품질 지수를 관리함으로써 공급되는 전력의 품질을 최대화하는 동시에 유지보수를 위한 기준을 제시해줌으로써 전력품질의 저하 원인을 최소화하기 위해서 고안된 것이라 할 수 있다.

또한 이를 실현하기 위해서는 방대한 량의 데이터를 통합적으로 관리하는 시스템이 필수적이다. 이러한 데이터에는 전자기적인 여러 이벤트들이 포함되며 그 예는 다음과 같다.

- 주요 측정 장비에 대한 정보
- PQ 모니터링 데이터 (전압, 전류의 실시간 파형/측정치 및 응용데이터)
- 사고 기록
- 유지보수 활동 기록
- 지역 정전에 대한 정보
- SCADA 정보
- 날씨(낙뢰) 데이터 등

이러한 데이터들을 종합적으로 분석하여 추가적인 정보를 추출하고 이를 전력회사에게 정확히 전해 줌으로써 전력회사로 하여금 정확하고 신속한 의사결정의 기준으로 활용될 수 있는 것이다.

외국의 경우에는 2000년부터 여러 기관과 단체들이 힘을 모아 전력품질을 이용하여 유지보수방안을 개선하고자 하는 연구를 체계적으로 이어가고 있는 상황이다.

우리나라에서도 대학, 산업체, 연구기관 등이 협력하여 통합적인 연구가 하루빨리 진행되어야 한다.

3. 결　론

지금까지 전력품질지수에 대한 통계적 처리 방법들과 이를 이용한 유지보수 기법의 개발에 대해 알아보았다. 배전계통 내의 전력품질의 향상을 위해서, 나아가 유지보수를 위한 판단 근거로 활용하기 위해서 여러 가지 컨트롤차트를 이용해야 함은 물론 실제 전압/전류 파형을 자세히 관찰해 볼 필요가 있다. 그리고 각 품질지수만의 고유한 특성에 따라 적절한 컨트롤차트를 선택하여 가능한 한 많은 전력품질 지수에 대해 적용해보아야 한다.

방대한 량의 데이터를 저장하고 분석하기 위해서는 일정 조건에 대한 트리거링 조건을 정확히 설정하는 것도 중요하다. 이상 현상에 대한 특정한 이상 패턴을 트리거링 조건으로 하는 것도 중요하나 컨트롤차트를 트리거링 조건으로 이용하는 것도 매우 좋은 선택이라 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] D.C. Montgomery, "Introduction to Statistical Quality Control", John Wiley & Sons. Ins, 2005