

송전선로 파라미터 정밀 예측을 위한 페이저 측정기의 응용

조기선* · 박종배* · 신종린*
*건국대학교 전기공학과

Estimation Technique of Power Transmission Line Parameter by Phasor Measurement Units

KI-Seon Cho* · Jong-Bae Park* · Joong-Rin Shin

*Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ

kantkorea@empal.com · jrshin@konkuk.ac.kr · jbaepark@konkuk.ac.kr

Abstract - This paper presents an approach to estimate the power transmission line parameter by phasor measurement units(PMUs), which are synchronized to 1 pps signal of GPS. Existing approaches to estimate power transmission line parameter, are mainly off-line ones, based on faults or switching events on other neighboring lines. In this paper, to obtain static and dynamic properties of power transmission line parameter in service, the prototype of pmu-based Transmission Line Parameter Monitoring System (TLPMS) is proposed. Also, an technique to estimate parameters of transmission line described as 2-port network model and the soundness of estimated parameters are addressed.

Keyword : Phasor Measurement Unit (PMU), Transmission Line Parameter, TLPMS (Transmission Line Parameter Monitoring System)

1. 서 론

경쟁적 전력시장에서 시장의 투명성을 확보하고 시장을 활성화하기 위해서는 무엇보다 시장에서 발생하는 각종 분쟁에 대한 원만한 해결과 시장참여자가 투입한 재화에 대한 합당한 평가가 이루어져야 하며, 더불어 독점의 형태로 남게되는 송전망의 효율적인 유지 관리가 중요하다 하겠다. 모든 시장 참여자가 동일한 자격으로 이용하게 되는 송전망에 대한 유지관리 및 적절한 확충계획은 완전경쟁 전력시장에서의 시장의 투명성과 시장 활성화에 무엇보다 중요한 요소로 인식되고 있으며, 본 시장이 열리기 전에 충분한 사전검토가 이루어져야 한다. 최근까지도 송전망에 관련된 각종 파라미터 특히 송전선로 선로정수는 설비의 시설 당시의 설계수치나 엔지니어의 경험적인 지식이 반영된 계산된 수치를 사용해 오고 있다. 경쟁적 전력시장에서 송전망의 적절한 유지보수 시점을 결정하고 온당한 확충계획을 수립하기 위해서 기존의 시설되어 있는 송전망의 동적 및 정적 파라미터의 계산이나 추정기법이 절실히 요구된다.

송전선로의 파라미터를 계산하는 일반적인 해석방법으로 사용하고 있는 Carson 정식은 많은 자료가 요구되며 일부 가정을 요구한다. 특히, 대지저항이나 대지의 수분함유량과 지면 특성에 따라 달라지게 된다. Philipot[1]는 송전선로를 집중정수로 모델링하고 평형부하조건에서 관심 선로를 단상 트립/재폐로하고 사고기록계로 데이터를 취득하여 WLS(weighted Least Square)를 통해 송전선로 파라미터를 도출한 바 있다. Koglin[2]은 송전선로를 서지임피던스와 전파상수를 포함한 2-port 망으로 모델링하고, 관심 송전선로 외부에서 사고를 모의하고 관심선로 말단에서 데이터를 취득하여 파라미터를 도출하는 방법을 제시하였다. 이들 접근기법[1,2]은 모두 관심선로 내부나 외부에서의 사고 및 스위칭 동작에 의거하여 선로정수를 도출하는 off-line 기법이다. 본 저자 등은 [3]에

서 전력계통의 전 모선에 페이저 측정기(PMU)를 시설하여 추가적인 상정사고 없이 전력계통의 모든 파라미터를 추정할 수 있다. 선행된 연구는 주로 off-line 형태의 접근기법이며, 관심선로에 대한 내부 및 외부에 사고를 설정하고 이때 계량된 물리량을 통해서 송전선로의 선로정수를 도출하고 있다. 본 논문에서는 송전선로의 정적인 선로정수와 더불어 동적 선로정수까지 도출하기 위해서 운용중인 관심선로 양단에 GPS에 의해 시각동기기능을 갖춘 PMU를 시설하고 계량된 실시간 물리량을 이용하여 선로정수를 추정하는 시스템에 관한 구성과 그 추정기법에 제안하였다.

2. 송전선로 선로정수 추정시스템

2.1. 선로정수 추정시스템 구성

본 연구에서 기초 설계한 송전선로 정수 추정 및 감시시스템인 TLPMS (pmu-based Transmission Line Parameter Monitoring System)의 구성도는 그림 1과 같다. 제안한 TLPMS는 GPS의 1 pps 신호와 동기를 위한 GPS 기반 시각동기보드를 탑재한 PMU를 송전선로 양단에 시설하여 높은 시각동기 정밀도하에서 계량된 양단 물리량을 통해서 송전선로의 선로정수를 추정하는 시스템이다.

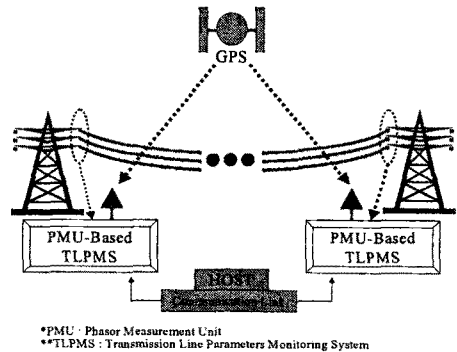


그림 1 제안한 선로정수 추정시스템 구성도
Fig. 1 Configuration of the proposed TLPMS

본 TLPMS는 계량을 담당하는 PMU가 정밀한 계량 시각의 동기를 실현하고 있으므로 하여 선로정수를 요구하는 송전망의 임의 구간에 대해서도 확장할 수 있으며, 계량이 가능한 일부 송전선로 구간에 국한되는 것은 아니다.

2.2. 선로정수 추정

TLPMS의 양단 PMU에서는 측정된 3상 전압/전류페이저와 대부분으로 변환한 대칭분 페이저를 제공한다. 본 TLPMS는 계량된 상 물리량이나 정상분 페이저(positive sequence phasor) 이용하여 평형상태의 송전선로 선로정수를 도출한다.

송전선로는 그림 2와 같이 chain 파라미터를 이용하여 표현할 수 있다.

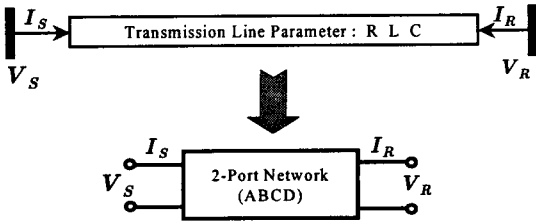


그림 2 Chain 모수를 이용한 송전선로 동가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of TL with chain parameter

관심선로의 송·수전단(sending·receiving-end) 사이의 관계는 chain 모수를 이용한 2-port 망으로 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 V_S, I_S 는 각각 송전단의 정상분 전압 및 전류 페이저, V_R, I_R 은 수전단의 정상분 전압/전류 페이저, 그리고 모수인 $ABCD$ 는 [무단위, Ω, S]의 단위를 갖는 파라미터이다. 동일한 측정시각의 동기하에서 계량된 TLPMS의 물리량인 V_S, I_S, V_R, I_R 을 통해서 모수인 $ABCD$ 를 결정함으로써 송전선로의 R, L, C 를 결정할 수 있다.

(1)을 모수와 매 샘플링 시점에 대한 측정치로 정식을 재구성하면 (2)와 같은 관계식을 유도할 수 있다. 여기서, k 는 샘플링 횟수를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} V_S^{(k)} \\ \vdots \\ V_S^{(1)} \\ \dots \\ I_S^{(k)} \\ \vdots \\ I_S^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_R^{(k)} & I_R^{(k)} & \vdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_R^{(1)} & I_R^{(1)} & \vdots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \vdots & V_R^{(k)} & I_R^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \vdots & V_R^{(1)} & I_R^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} \quad (2)$$

(2)에서 나타난 바와 같이 모수 $ABCD$ 중에서 AB 와 CD 는 상관성이 없기 때문에 수전단 측정치로 구성된 계수행렬을 부분행렬로 분할하여 (3)과 같이 처리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_S^{(k)} \\ \vdots \\ V_S^{(1)} \\ I_S^{(k)} \\ \vdots \\ I_S^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_R^{(k)} & I_R^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ V_R^{(1)} & I_R^{(1)} \\ V_R^{(k)} & I_R^{(k)} \\ \vdots & \vdots \\ V_R^{(1)} & I_R^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{bmatrix} \quad (3)$$

정식(3)에서 주목할 사항은 계량된 물리량에 포함된 계량오차가 고려되어 있지 않다는 것이다. 모수 $ABCD$ 는 AB 와 CD 에 대한 개별 정식을 통해서 결정하기 위해서 의사역행렬을 도입하여 (4)와 같이 정식화될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} V_S^{(k)} \\ \vdots \\ V_S^{(1)} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{M}^T \begin{bmatrix} I_S^{(k)} \\ \vdots \\ I_S^{(1)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, $\mathbf{G} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})$ 이다. 모수인 $ABCD$ 를 정확하게 도출하기 위해서는 이득행렬 \mathbf{G} 가 양호조건(well-conditioning)에 있어야 한다. 이러한 계량오차 및 이득행렬 \mathbf{G} 의 조건수(condition number)에 대해서는 이어지는 장에서 논의한다. 계량오차 및 계수행렬의 조건에 대한 사항이 고려된 후 모수인 $ABCD$ 는 어드미턴스(admittance) 파라미터로 변환하여 송전선로의 정수인 R, L, C 를 도출할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \quad \text{where,} \quad (5)$$

$$y_{11} = \frac{D}{B}, \quad y_{12} = -\frac{AD-BC}{B}$$

$$y_{21} = -\frac{1}{B}, \quad y_{22} = \frac{A}{B}$$

도출된 어드미턴스 파라미터를 2-port 망의 병렬연결로 등가화하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

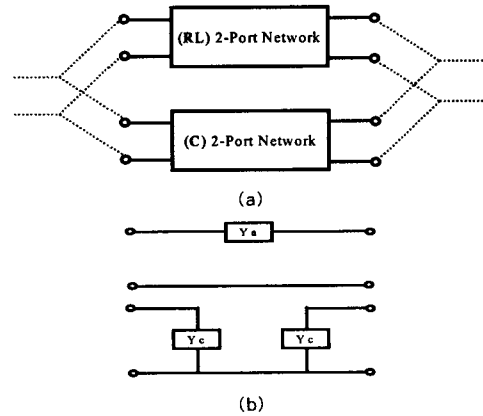


그림 3 2-port 망의 병렬연결
Fig. 3 Parallel connection of 2-port networks

따라서, 송전선로의 선로정수인 R, L, C 는 다음 (6)에 의해서 결정할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R \\ L \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{real}(B) \\ \frac{\text{imag}(B)}{\omega} \\ \frac{(D-1)/B}{\omega} \end{bmatrix} \quad (6)$$

본 TLPMS이 송전선로의 선로정수를 도출하기 위해서는 수전단의 계량 물리량으로 구성된 이득행렬이 양호조건에 있어야 한다. 측정시간의 측정시각의 간격이 짧을 경우에는 불량조건(ill-condition)이 될 확률이 높아진다. 따라서, 이득행렬이 우량조건이 되기 위한 측정시간의 간격을 산출하는 것도 또한 중요한 일이다. 또한, TLPMS의 양단에 시설된 PMU에서 계량된 물리량에도 계량오차가 포함되어 있기 때문에 이득오차에 대한 분석이 선행되어야 한다.

3. 계량오차 및 이득행렬의 조건수

3.1. 페이저 측정기의 계량 오차

TLPMS의 계량 단말기인 PMU는 GPS에 의해 $1\mu s$ 이상의 계량 시각의 동기화를 유지할 수 있어, 동기오차가 상대적으로 작으며, PMU에 포함될 수 있는 오차는 계기용변성기의 고유 계량오차와 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 과정에서 발생하는 분해능(Resolution)에 의한 오차를 들 수 있다. 통신오차는 별개의 문제로 취급할 수 있다.

GPS의 시각신호에 동기하여 물리량을 계량한 경우와 일반 측정기로 계량한 물리량 사이의 비오차를 계산하면 (7)과 같다. (7)에서 $RE_{v_{EXISTING}}$ 과 $RE_{v_{GPS}}$ 는 각각 일반 측정기의 비오차와 GPS에 동기된 PMU의 비오차를 나타내며, α 는 측정 시각의 동기오차이며, β 는 계기용변성기의 고유 측정오차와 분해능에 의한 오차를 포함한 오차이고, v_T 는 전압의 순시치를 나타낸다.

$$\begin{aligned} RE_{v_{EXISTING}} &= \frac{|v_T - v_{EXISTING}|}{v_T} \\ &= \frac{|Ve^{j\omega t} - Ve^{j\omega t} e^{-j\alpha} \times (\beta + 1)|}{|Ve^{j\omega t}|} \\ &= |(\beta + 1)e^{-j\alpha} - 1| \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} RE_{v_{GPS}} &= \frac{|v_T - v_{GPS}|}{v_T} \\ &= \frac{|Ve^{j\omega t} - Ve^{j\omega t} \times (\beta + 1)|}{|Ve^{j\omega t}|} = |\beta| \end{aligned}$$

(7)에 제시된 바와 같이 PMU의 계량오차는 계기용변성기의 계량오차와 분해능에 의한 오차만으로 고려될 수 있다. 분해능에 의한 오차는 A/D 변환기의 선형 및 보상회로에 의한 문제로 인식되며, 계기용변성기의 계량오차는 동일한 정밀도를 갖는 계기용변성기를 사용할 경우에는 정식(3)의 좌우변이 동일한 오차로 반영되기 때문에, 계수행렬이 양호조건하에 있다면, 계수행렬의 부정확성이 도출된 모수에 미치는 영향과 기지벡터인 우변항의 부정확성이 모수에 미치는 영향이 동일하게 반영되어 이들 계기용변성기의 고유오차에 의한 영향이 본 연구의 모수에 미치는 영향은 배제할 수 있다. 물론, 계량된 물리량이 이상값(outlier)인 경우에는 별개의 문제로 취급하여 검출 및 제거하여야 한다. 정식(3)은 1회선 송전선로에 관한 정식이고, 다회선(multi-circuit) 송전선로에 대해서는 각 회선별 물리량 사이의 관계식을 통해서 고유오차를 일부 소거할 수 있다(키르히호프의 전류법칙과 PMU의 여분 채널을 통한 전압의 다중 계량).

3.2. 이득행렬의 조건수

모수인 ABCD를 정밀하게 추정해내기 위해서는 전술한 TLPMS의 이득행렬 G 가 양호조건하에 있어야 한다. 여기서 "이득행렬 G 가 양호조건이다" 내지는 "불량조건이다"라고 하는 것은 단순히 정성적이며, 어떤 행렬의 불량조건은 조건수(condition number)를 통해서 확인할 수 있다.

이득행렬 G 의 조건수 $k(G)$ 는 행렬정규(matrix norm)를 통해 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$k(G) = \|G\| \|G^{-1}\| = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_{\min}} \quad (8)$$

여기서, λ 는 고유치(eigenvalue)이다. 이득행렬 G 는 2×2 행렬이므로 두 고유치의 비율(ratio)에 의해서 이득행렬의 조건수가 결정되며 고유치는 거듭제곱법(power method)나 반

복적인 QR분해를 통해서 도출이 가능하고 Gerschgorin 정리(inclusion theorem)를 이용하여 근사적 범위를 통한 근사해를 도출할 수도 있다.

정밀한 선로정수의 도출에 근간이 되는 이득행렬의 불량조건에 대해서 두 가지 접근방법을 고려해 볼 수 있다. 첫 번째는 불량조건하에 놓이지 않도록 취득 데이터를 선별적으로 사용하는 방법이다. 즉, 이득행렬을 구성하는 측정치의 간격을 조정하여 이득행렬이 양호조건하에 있도록 하는 방법이다. 이는 연산을 수행하는 시스템의 하드웨어적인 구성과 밀접한 관계가 있다. 본 연구에서 제시된 TLPMS를 구현하는 방식(산업용PC, stand-alone)에 따라서 이득행렬의 불량조건의 정도가 달라지기 때문에 구현방식을 결정하고 데이터 선별의 연구가 진행되어야 한다. 두 번째는 불량조건을 완화하는 기법으로 스펙트럼 사상정리(spectral mapping theorem)를 이용하여 고유치를 복소평면에서 양의 실수 방향으로 미소량 만큼 이동(shifting)하는 방법이다. 이득행렬의 조건수가 불량조건에 있음은 고유치의 최대값이 아니라 주로 최소값이 0에 근접함으로써 발생하는 문제이므로 고유치를 이동하는 방법이 효과적일 수 있으나, 미소량의 이동계수를 결정하는 문제가 남아 있으며, 연산을 수행하는 프로세서의 데이터 표현 범위 또한 이 접근방법의 주요한 결정요소가 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 과거 설비의 시설당시의 설계수치나 엔지니어의 경험적 지식을 바탕으로 계산된 수치를 사용해 오고 있는 송전선로의 선로정수를 운용중인 선로에 대한 동적 선로정수를 도출하기 위한 송전선로 선로정수 감시 시스템(TLPMS: pmu-based Transmission Line Parameter Monitoring System)의 원형을 제안하였으며, 관련 추정기법과 더불어 선로정수의 안정성에 관하여 논의하였다.

제한한 TLPMS는 관심선로 양단에 GPS의 시각신호동기 기능을 갖춘 PMU를 시설하고 계량된 물리량을 이용하여 관심선로의 선로정수를 도출하는 시스템이다. 선로는 2-port 망으로 모델링하였고, 계량된 양단 물리량과 선로정수의 관계식을 유도하여, 미지의 선로정수를 결정하였다. 선로정수를 결정함에 있어서 계량 물리량에 포함된 고유의 계량오차(계기용변성기의 오차와 A/D 변환기의 분해능에 의한 오차)와 선로정수 결정 공식에 포함된 이득행렬의 조건수에 대해서 검토하였다.

제시한 TLPMS 원형은 구현 방법에 따라서 선로정수 추정의 안정성이 달라질 수 있으며, 이를 보완하는 다양한 접근을 시도할 수 있다. 향후, 본 논문에서 제안한 TLPMS를 산업용 PC 및 stand-alone 기반으로 구현하고 각 구현 방법에 따라 선로정수 추정 성능과 안정성을 보완하는 연구를 수행할 계획이다.

[Acknowledgement]

This work was supported by a grant No. R01-2001-000-00304 from Korea Science & Engineering Foundation.

[참 고 문 헌]

- [1] L.Philippot and J.-C.Maun, "An Application of Synchronous Phasor Measurement to the Estimation of the Parameters of an Overhead Transmission Line," in *Proceedings of the Fault and Disturbance Analysis and Precise Measurements Conference*, Arlington, Virginia, November 1995.
- [2] H.-J. Koglin and M. Schmidt, "Estimation of transmission Line parameters by evaluating fault data records," in *Proceedings of the 12th Power Systems Computation Conference*, Dresden, Germany, August 1996.
- [3] 송시철, 조기선, 신준원, "동기 페이저 측정치를 이용한 전력계통 매개변수 추정", 2000 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권, 2000.7