

직류시스템 해석을 위한 상태추정 알고리즘에 관한 연구

A Study on the State Estimation Algorithm for DC System Analysis

권혁일*, 김홍주**, 김주용**, 조윤성*

Hyuk-Il Kwon*, Hong-Joo Kim**, Juyong Kim**, Yoon-Sung Cho*

Abstract

Analysis methods in the power system are static analysis, dynamic analysis and online analysis, offline analysis. The static analysis is used for the existing power system analysis method and the static analysis is mainly used for PSS / E. However, in the real system where the value changes in real time which we are using, dynamic analysis is required which can be analyzed in real time for accurate analysis. Therefore, attention is focused on EMS (Energy Management System) and importance is increasing. Among the various EMS systems, we will cover state estimation, which is a static on-line analysis that can receive and interpret data from the acquisition point in real time. DC systems are spreading in various fields such as DC load, DC distribution, renewable energy. As such, much attention and attention are focused on the DC system. In this paper, we have studied the feasibility through the case study and the interpretation of the state estimation that can be applied to the DC system.

요약

전력계통에서 해석 하는 방법종류로 정적해석과 동적해석 그리고 온라인 해석과 오프라인 해석으로 나뉜다. 기존의 계통 해석하는 방법으로는 오프라인 정적해석을 이용하며 PSS/E에서도 정적해석을 주로 사용한다. 하지만 우리가 사용하고 있는 실제 계통에서는 실시간으로 값이 변한다. 정확한 해석을 하기 위해 실시간으로 해석이 가능한 온라인 해석과 동적해석이 요구되며 이에 따라 EMS(Energy Management System)에 대한 중요도가 높아지고 있다. 본 논문에서는 다양한 EMS시스템 중에서도 실시간으로 취득 점으로부터 데이터를 받아와 해석 할 수 있는 정적 온라인 해석인 상태추정을 다룰 것이다. 오늘날 DC 부하, DC배전망, 신재생에너지 등 다양한 분야에서 DC계통이 확산되고 있다. 이처럼 DC계통에 많은 관심과 이목이 집중되고 있다. 본 논문에서는 DC계통에 접목시킬 수 있는 상태추정에 대한 해석과 사례연구를 통한 사용가능성에 대해 연구하였다.

Key words : EMS, State Estimation System, DC systems, DC distribution, Case study

* Electronics Engineering, Daegu Catholic University

** Smart Power Distribution Laboratory, KEPRI

★ Corresponding author

E-mail : philoscho@gmail.com, Tel : +82-53-850-2782

※ Acknowledgment

This research is the result of training of human resources supported by KETEP's energy manpower development project funded by the Ministry of Industry and Commerce in 2017. (No.20174010201330)

Manuscript received Sep. 7, 2018; revised Sep. 18, 2018; Accepted Sep. 19, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 전력계통에서는 조류의 흐름, 모선의 전압 등을 감시하여 EMS(Energy Management System)을 통하여 안전도를 유지한다. 하지만 EMS의 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)를 사용 시에 측정하는 과정에서 잡음이 유입되는 경우가 생긴다. 상태추정 해석은 데이터에 잡음으로부터 미치는 영향을 조절하기 위해 가중치를 두어 조정함으로써 잡음(Noise)에 대한 영향을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 상태추정에 대한 알고리즘을 설명하고 DC계통에 접목시키기 위한 연구과정과 사

레연구를 통하여 DC상태추정에 대한 사용가능성을 확인해 보았다.

II. 본론

1. DC 상태추정

본 논문에서는 DC 상태추정에 대하여 연구 하고자 한다. 상태추정은 온라인으로 다양한 측정 점에서 측정해오는 측정값을 받아 해석하는 정적 온라인 해석 방식이다. 온라인으로 측정값을 받아오는 방식이기 때문에 측정하는 과정 또는 데이터가 전송되어 오는 과정에서 잡음이 추가된 채로 데이터가 측정될 수 있다. 이로 인해 정확한 해석이 안 되고 오류를 포함한 결과 값이 도출되게 된다. 이러한 잡음에 대한 영향을 조절하기 위해 각 측정요소와 연관 있는 부분에 대한 가중치를 조절하여 오차에 대한 영향을 조절하는 방법과 이전 단계에서 사용하였던 데이터를 가져와 모델링 값과 운전원이 입력한 값을 이용하는 의사측정값 법이 있다.

2. 상태추정 알고리즘

상태추정 방식에는 상태변수 값 전압과 위상각에 대한 편차의 합을 최소로 해야 하는 문제로 수식화할 수 있다. 이러한 문제는 가중최소자승법(WLS, Weighted Least Square)을 적용하여 해결할 수 있고 다음의 목적 함수를 최소화한다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m (z_i - h_i(x))^2 / R_{ii} \tag{1}$$

$$= [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]$$

최소 점에서 1차 최적 조건이 충족될 것이다. 다음으로 간단한 형태로 표현 할 수 있다.

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0 \tag{2}$$

here, $H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right]$

상태 벡터 x^k 에 대해 비선형 함수인 $g(x)$ 를 테일러급수 전개 하면 다음과 같은 식이 나온다.

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \tag{3}$$

아래와 같이 고차 조건을 무시하면 가우스 뉴턴 방법으로 알려진 반복 결과 값이 나온다.

$$x^{k+1} = x^k + [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \tag{4}$$

여기서 k는 반복 지수

x^k 는 k번째 반복에서의 솔루션 벡터

다음 초기 값을 만들고 H행렬을 구성한다. H행렬과 공분산 행렬을 이용하여 이득행렬G를 구하고 마지막으로 X값을 도출해낸다. 그리고 X값 변화량 중 오차가 제일 큰 값이 설정오차 값보다 작을시 수행완료 되고 설정오차보다 크면 불량 데이터의 유무를 확인한다. 불량 데이터가 없으면 다시 반복하여 수행하고 불량데이터가 있을시 가중치를 변경한 다음 다시 반복을 수행한다. 상태추정의 순서도는 그림 1과 같다.

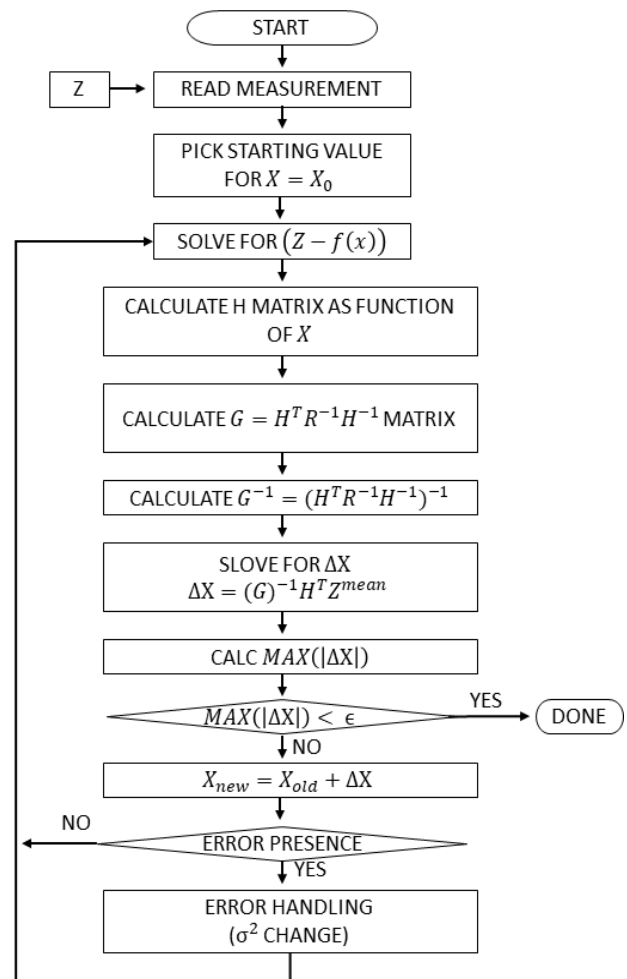


Fig. 1. State Estimation flowchart.

그림 1. 상태추정 순서도

2.1 Jacobian 행렬 구성

AC계통에서 상태추정을 할 때 사용되는 Jacobian

H행렬의 구성은 다음 식 (5)과 같다. 행렬의 각 요소는 발전과 부하 값(Pinj, Qinj)과 조류(flow)값 그리고 전압과 전류의 크기 값(mag)에 대한 위상각과 전압의 편미분으로 구성되었다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\in j}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{\in j}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{\in j}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{\in j}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{flow}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial I_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{mag}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (5)$$

DC계통을 해석하기 위해 H행렬을 다시 구성하면 다음과 같은 식(6)으로 구성 된다. 그리고 DC H행렬의 구성요소를 구하는 방법은 식(7)과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{\in j}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{flow}}{\partial V} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} &= \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij}) + V_i G_{ii} \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_j} &= V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} &= -V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij}) + 2(g_{ij} + g_{si}) V_i \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} &= -V_i (g_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ \frac{\partial V_i}{\partial V_i} &= 1 \\ \frac{\partial V_i}{\partial V_j} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

H행렬과 공분행렬을 통하여 이득행렬G를 구하고, 마지막으로 계산식(9)을 통해 추종 값을 도출할 수 있다.

$$G = [H]^T [R^{-1}] [H] \quad (8)$$

$$X^{est} = [G]^{-1} [H]^T [R^{-1}] Z^{mean} \quad (9)$$

2.2 최대 정규화 잔류(r_{max}^N) 판별

불량데이터의 정규화된 잔류 특성은 불량데이터를 식별할 수 있다. 이를 최대 정규화 잔류 판별이라고 하며 다음과 같이 구성 된다.

1. WLS 추정을 해결한 다음 측정 잔류 벡터의 요소를 구한다.

$$r_i = z_i - h_i(\hat{x}), \quad i = 1, \dots, m \quad (9)$$

2. 정규화된 잔류를 계산한다.

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad i = 1, \dots, m$$

3. r_k^N 은 모든 $r_i^N, i = 1, \dots, m$ 중 가장 큰 값을 가지게 되는 k를 찾는다.
4. $r_k^N > c$ 이면, k번째 측정은 불량데이터로 여긴다. $r_k^N \leq c$ 이면 불량데이터로 여기지 않는다. (여기서, c는 선택된 식별 임계치 값)

3. 사례연구

Cigre논문에 기술된 DC EMS계통을 이용하여 사례연구 하였다. 우선 초기 값과 위의 식을 이용한 결과 값 이 두 개의 값의 편차를 확인한 후 DC 상태추정에 대한 사용가능성을 알아보았다.

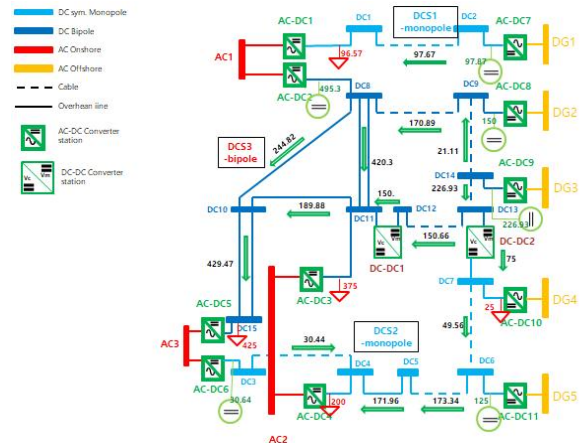


Fig. 2. Cigre DC EMS diagram.

그림 2. Cigre DC EMS 계통도[1]

위의 그림 2를 토대로 Matlab을 이용하여 계산한 결과로 표 1과 같은 결과 값을 얻게 되었다. 표에서 보는 것과 같이 두 값의 오차가 작은 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 DC상태추정 해석에 관한 타당성을 살펴 볼 수 있다.

Table 1. Voltage deviation about DC state estimation.

표 1. DC상태추정에 대한 전압 편차

Bus voltage	Initial value (Kv)	Estimated value (Kv) -3 Iteration-	Error rate (%)
V1	50.54	49.8272	1.41
V2	50	50.7441	-1.48
V3	49.5	49.1032	0.80
V4	49.3575	48.8046	1.12
V5	49.93	49.9534	-0.046
V6	50.34	50.7661	-0.84
V7	50.5725	51.2257	-1.29
V8	101	103.822	-2.79
V9	101.4	104.614	-3.16
V10	99.275	99.2663	0.008
V11	99.815	100.004	-0.18
V12	100.5825	103.075	-2.47
V13	100.94	103.754	-2.78
V14	101.4725	104.755	-3.23
V15	98.35	95.5181	2.87

두 번째로 불량데이터에 입력 시 계통에 미치는 영향과 가중치를 변경한 다음 조치하였을 때 계통에 변화를 살펴보았다. 불량데이터가 입력 될 때 이상하게 추정 값이 나오는 것을 볼 수 있다. 이를 해결하기 위하여 가중치를 조정해 다음 계산 하였으며 전압 값이 기존의 정상상태 근처로 돌아 왔을 시 다시 가중치를 기존의 값 복귀한 다음 계산하였다.

Table 2. Voltage fluctuations due to error data on buses 1, 3, and 15.

표 2. 1, 3, 15번 모선의 불량데이터로 인한 전압변동

Bus voltage	Initial value(Kv)	1 Iteration (Kv)	3 Iteration (Kv)	5 Iteration (Kv)
V1	50.54	29.866	42.9633	49.8275
V2	50	32.865	43.8226	50.7443
V3	49.5	40.3124	49.1254	49.1033
V4	49.3575	38.6972	48.8267	48.8047
V5	49.93	39.9346	49.9814	49.9535
V6	50.34	40.906	50.7939	50.7662
V7	50.5725	41.4548	51.2535	51.2258
V8	101	93.961	113.6773	103.7704
V9	101.4	94.8311	114.4	104.5631

Bus voltage	Initial value(Kv)	1 Iteration (Kv)	3 Iteration (Kv)	5 Iteration (Kv)
V10	99.275	88.9594	109.5209	99.2119
V11	99.815	89.7684	110.1955	99.9502
V12	100.5825	93.1469	112.993	103.0236
V13	100.94	93.8916	113.613	103.7031
V14	101.4725	94.9874	114.5274	104.704
V15	98.35	84.3921	106.1412	95.4612

표 2에서 보는 것과 같이 불량데이터가 기입 되었을 경우 추정 값에 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 그러나 가중치를 조절함으로 인해서 추정 값에 대한 영향이 줄게 되고 다시 정상상태의 값 근처로 돌아오는 것을 볼 수 있다. 보는바와 같이 가중치 조절로 인해 불량데이터에 대한 영향을 줄일 수 있다는 것을 확인 하였다.

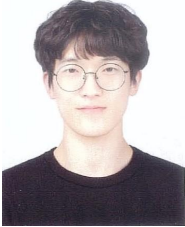
III. 결론

DC계통에 상태추정 적용방법에 대해 소개하였다. Cigre DC EMS계통을 이용하여 연구와 분석을 하였고 초기의 값과 추정을 통해 나온 결과 값의 오차는 작은 것을 확인 할 수 있었다. 불량데이터 입력 시에 따른 전압변동과 그에 대한 조치방법에 대한 연구를 하였다. 온라인으로 상태추정 해석을 수월하게 수행하기 위해서는 기존의 역행렬(inverse)이 많은 방식에서 역행렬을 없앤 다음 계산하는 QR algorithm를 이용한 상태추정연구가 추가로 요구된다.

References

[1] DIgSILENT Ibérica, Universidad Carlos III de Madrid, "CIGRE WG B4.57 and B4.58 DC GRID TEST SYSTEM PART I: LOAD FLOW MODEL in DIgSILENT PowerFactory," *DIgSILENT Ibérica*.
 [2] Allen J. Wood·Bruce F. Wollenberg·Gerald B.Sheble, *Power Generation Operation and Control*, WILEY, 2014.

BIOGRAPHY

Hyuk-II Kwon (Member)

2018 : BS degree in Electrical Engineering, Daegu Catholic University.

Yoon-Sung Cho (Member)

2008 : He received PhD degree in electrical engineering from Korea university
2012~2015 : Research Engineer, LS Industrial Systems

Hong-Joo Kim (Member)

He is a Principle manager in KEPRI. received the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Electronic Engineering degrees from Korea University, Seoul, Korea in 2010 and 2012, respectively.

He joined Korea Electric Power Research Institute, KEPCO in 2016.

Juyong Kim (Member)

He is a Principle manager in KEPRI. received the M.S. and Ph.D. degrees in Electrical and Electronic Engineering degrees from Kyungpook National University, Daegu, Korea in 1994 and 2007, respectively.

He joined Korea Electric Power Research Institute, KEPCO in 1994.