

분산전원이 포함된 복합배전계통 상태추정

임 재섭* 이 광기 권 형석 김 흥래
순천향대학교 전기공학과

State Estimation on the Composite Distribution System with Distributed Generation

Jae Sup Lim Koang Kee Lee Hyung-seok Kwon Hongrae Kim
Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University

Abstract - Distributed generation (DG) is predicted to play an increasing role in the electric power system of the near future. Distributed generation is by definition that is of limited size (roughly 10MW or less) and interconnected at the substation, distribution feeder or customer load levels. The effects of generation sources within a distribution network on the system losses are investigated in this paper. WLAV state estimation is performed with the composite distribution system containing DG. Simulations with test cases are performed and the results are presented, using IEEE34 bus radial distribution system.

Keywords: State estimation, Distribution System, Distributed Generation

1. 서 론

최근 산업의 고도화와 에너지환경의 변화 등에 따라서 안정적인 전력수급을 위해 기존의 발전형태와는 다른 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산전원 보급 확대가 예상되고 있다. 분산전원은 연료전지, 풍력발전, 태양광 발전, 소형열병합발전과 같은 소규모의 발전시스템을 의미한다. 따라서 소형화가 가능하고 환경친화적이며 비상전원(back-up generation)으로서의 활용성을 감안하면 배전계통의 연계가 효율적이고, 그림 1과 같이 분산전원이 연계된 배전계통을 복합배전계통이라 한다.

분산전원이 포함된 전력계통에서는 송배전 건설비용 절감, 전압 보상, 손실 감소 또한 재생 에너지원의 사용으로 환경오염이 적다. 그러나 배전계통의 전압조정 및 변동 문제, 고조파, 고립운전, 전력품질 저하, 단락용량 증가, 보호협조 등의 문제가 제기되고 있어 이에 대한 연구가 진행 중에 있다.

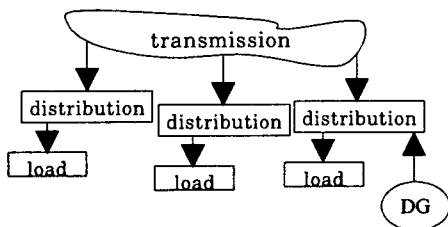


그림 1. 분산전원이 포함된 복합배전계통

수용가와 밀착되어있는 배전계통의 경우 그 사회적 반향을 고려하여 그 중요성이 점점 강조되고 있으며, 따라

서 그간 우리나라를 포함한 세계 여러 나라에서 배전자동화나 수요측 관리 등의 계획을 꾸준히 진행하여 왔다. 최근에는 세계 각국의 전력산업 구조개편과 맞물려 배전계통의 효율적, 안정적 운용에 대한 필요성이 더욱 크게 부각되고 있다. 이러한 상황에서 효율적인 복합배전계통운용을 위해 상태추정(state estimation)은 반드시 필요한 기능이며 향후 배전계통과 분산전원의 적절한 감시 및 제어 위한 배전 SCADA 시스템이 구축될 경우 빠르게 발전하고 있는 정보기술 및 통신기술의 발전에 힘입어 매우 신뢰성 높은 배전계통을 운영할 수 있을 것이다. 최근의 발전속도로 볼 때 멀지 않은 장래에 매우 싼 값에 데이터 측정 및 전송 시스템을 배전계통과 분산전원 내에 구축할 수 있을 것으로 예상되며, 배전계통과 분산전원으로부터 적절한 계통운영상황 데이터를 측정하여 조류해석 및 상태추정에 사용할 경우 구조개편과 관련된 계통 운용 및 요금 정산 등에 사용할 수도 있을 것으로 기대된다.

조류계산이나 상태추정 프로그램은 일반적으로 송전계통을 대상으로 개발된 것으로, 계통의 운용상황이나 구조 등의 차이 때문에 배전계통 특히 분산전원이 도입된 복합배전계통에 그대로 적용하기에는 어려움이 따른다. 배전계통의 경우에는 계산하여야 할 변수의 수는 많은 반면 이용 가능한 데이터의 수가 적은 것이 일반적이며, 각 상간의 전압분포가 평형을 이루지 못하는 경우가 많이 있으므로 배전계통을 위한 조류계산 및 상태추정 기법을 개발하여야 한다.

본 논문에서는 배전계통에 포함된 분산전원의 위치별 계통 손실을 계산함으로써 분산전원의 최적위치를 결정하는 방법을 검토하였으며, 분산전원이 연계된 복합배전계통에 대한 상태추정기의 수렴성 및 불량데이터에 대한 강건성을 검사하였다. IEEE 34노선 계통을 사용하여 사례연구를 실시하였다(1).

2. 본 론

2.1 분산전원

기존의 배전계통은 방사상의 구조로 되어있으며 변전소 이후 수용가에 이르기까지 전원이 없이 설계되었다. 따라서 분산전원의 배전계통 연계 시 전력조류와 전압의 변화가 나타나고, 이와 같은 상황에서 배전계통의 상태나 분산전원의 특성에 따라 긍정적이거나 부정적인 영향을 미칠 것이다. 즉, 송배전 설비 건설비용의 절감, 전력손실의 감소, 전압보상 및 전력공급의 신뢰도 향상과 같은 장점을 얻을 수 있으나, 다른 한편으로는 전압변동, 전력품질의 저하, 고조파 단락용량의 증대와 같은 부정적인 영향도 간과할 수 없다. 분산전원은 비전기사업자의 소유가 대부분이고 태양열이나 풍력발전과 같은 가변 에너지원으로 인하여 항상 같은 상태의 복합배전계통 운용이 불가능한 문제점도 가지고 있다.

2.2 배전계통 상태추정

최근 우리나라의 전력수요는 도시의 개발이나 산업의 발전, 생활여건의 향상 등에 따라 지속적으로 증가하고 있

다. 이런 대형, 복잡화되고 있는 전력계통의 실시간 감시, 분석, 제어를 위하여 EMS가 사용되고 있으며, 이 EMS는 현대의 전력계통 운용에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 계통운용설비 중의 하나이다. 상태추정 기법은 이러한 EMS내에서 전력계통의 안정된 운용을 위해 사용되는 중요한 기본기능의 하나로, 계통 내의 여러 측정점으로부터 얻어진 측정값들을 이용하여 현재 계통의 상태변수(모선전압, 위상각)를 추정함으로써 계통의 운용상태를 감시, 그에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 기법이다.

최근 들어 전력계통 내에 전력전자 장비 등 여러 가지 비선형 부하가 증가하고 전력의 변화에 민감한 설비들이 증가함에 따라 전력품질에 대한 관심이 증가하고 있으며, 수용가와 밀착되어 있는 배전계통의 경우 그 운용에 대한 중요성이 점점 부각되고 있다. 이에 따라 기존에는 실행하지 않던 배전계통에 대한 상태추정의 필요성도 점차 증가하고 있다.

2.3 선로 모델링

배전계통은 송전계통과는 달리 3상간의 부하가 균등하게 배분되어 있지 않거나, 계속적인 연가가 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 배전계통의 3상 선로 임피던스의 대칭성분 중 정상분 임피던스를 사용하여 조류계산 및 상태추정을 실시하였다. 3상 가공선로와 전압강하 방정식이 각각 그림 2 및 식(1)과 같다.

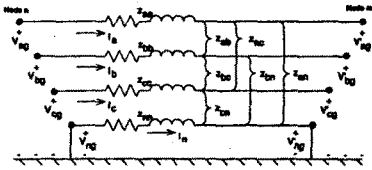


그림 2. 3상 배전계통 가공선로

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} & z_{an} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} & z_{bn} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} & z_{cn} \\ z_{na} & z_{nb} & z_{nc} & z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, V_{ag} , V_{bg} , V_{cg} 는 송전단의 전압,
 V'_{ag} , V'_{bg} , V'_{cg} 는 수신단의 전압,
 z_{ii} 는 선로의 자기 임피던스,
 z_{ij} 는 선로의 상호임피던스.

식 (1)과 같은 전압강하방정식에서 선로임피던스는 Carson 방정식을 이용하여 계산할 수 있다[2]. 식(1)에서 중성선의 전압을 $V_{ng}=0$ 이라고 가정하면 Korn 소거법에 의하여 4x4의 임피던스 행렬을 중성선의 영향을 포함한 식 (2)와 같은 3x3 임피던스 행렬로 표현할 수 있다. 선로임피던스를 대칭좌표법에 의하여 대칭성분으로 구성 분리할 수 있다. 대칭성분 전압과 전류는 식(3), (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix}$$

식 (3)에 $[A_s]^{-1}$ 를 곱하여 표현하면

$$\begin{aligned} [V_{012}]_n &= [A_s]^{-1} \cdot [V_{abc}]_n \\ [V_{012}]_m &= [A_s]^{-1} \cdot [V_{abc}]_m + [A_s]^{-1} \cdot [Z_{abc}] \cdot [A_s] \cdot [I_{012}] \\ [V_{012}]_n &= [V_{012}]_m + [Z_{012}] \cdot [I_{012}] \end{aligned}$$

$$[Z_{012}] = [A_s]^{-1} \cdot [Z_{abc}] \cdot [A_s] = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$

따라서, 대칭좌표법을 이용한 전압방정식은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{0n} \\ V_{1n} \\ V_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{0m} \\ V_{1m} \\ V_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Z_{00} = 영상분 임피던스,
 Z_{11} = 정상분 임피던스,
 Z_{22} = 역상분 임피던스.

로 표현한다. 본 논문에서는 3상 선로임피던스에서 정상분만을 고려하여 사례연구를 실시하였다.

3. 사례연구

그림 3에서와 같이 IEEE 34모선 시험계통을 사용하여 사례연구를 실시하였다. 시험계통은 3상 선로와 단상선로로 구성되어 있으며, 각 선로의 구성은 그림 4와 같다. 본 논문에서는 시험계통의 선로임피던스의 대칭성분 중 정상분만을 사용하였으며, A상에 대한 부하용량을 사용하였다.

IEEE 34모선 시험계통의 슬랙 모선을 제외한 각 모선별로 50 ~ 300kW의 분산전원을 투입하여 각 모선의 유효전력 손실을 계산한 결과가 그림 5와 같다. 34번 모선에 300kW의 분산전원이 연계되었을 경우 연계하지 않은 경우보다 약 73%의 손실이 감소하였다. 따라서, 계통손실만을 고려할 경우 34번 모선이 시험계통의 분산전원 설치의 최적위치라 판단할 수 있다. 그림 6은 분산전원 투입 전과 투입 후의 전압의 변화를 나타내고 있다. 대부분의 모선에서 전압이 상승하였고 특히 부하가 편중되어 있는 20번 모선 이후의 전압이 크게 상승하였음을 알 수 있다.

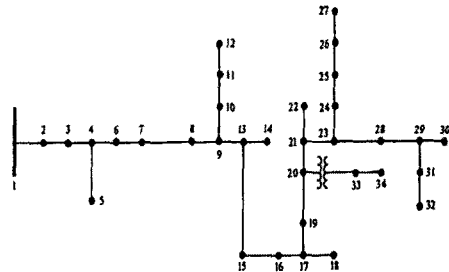


그림 3. IEEE 34모선 시험계통

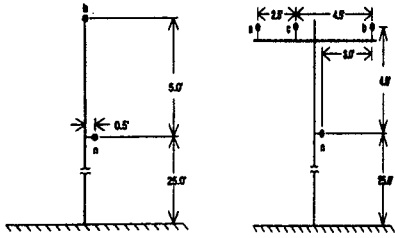


그림 4. 배전선로 모델

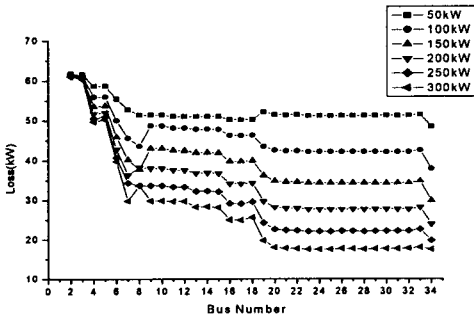


그림 5. 분산전원투입 후 모선별 손실

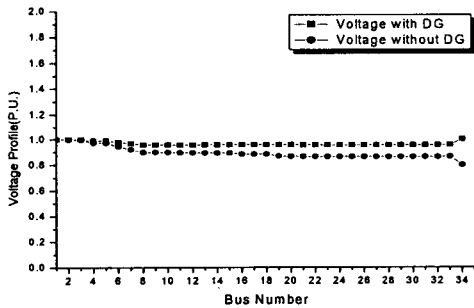


그림 6. 분산전원 유무에 따른 전압

선형계획법(Linear Programming)을 이용한 WLAV (Weighted Least Absolute Value) 상태추정기는 측정값과 계산값과의 차의 절대값을 최소로 하는 목적함수를 사용하고 있다. 선형계획법은 이 목적함수를 최소화시키기 위해 사용하며, 측정데이터에 에러가 포함되어 있을 경우, 선형계획법을 이용한 상태추정기는 불량데이터(bad data)에 대해 WLS(Weighted Least Square)보다 강건성을 보인다[3,4]. 복합배전계통의 WLAV 상태추정기의 수렴성 및 불량데이터의 강건성을 확인하기 위하여 IEEE 34모선 시험계통 내의 측정기 고장을 가정하여 다음과 같은 단일, 다중, 상호작용 불량데이터를 사용하여 상태추정을 실시하였다.

단일불량 데이터 : 21번 모선 주입전력
 다중불량 데이터 : 21번 모선 주입전력,
 24-25선로 조류전력

상호작용불량 데이터 : 21번 모선 주입전력,
 20-21선로 조류전력

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 WLAV 상태추정기는 단일, 다중, 상호작용 불량데이터에 대하여 약 10^{-3} 이내의 오차를 가지고 수렴하였으며, 불량데이터에 충분히 강건성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

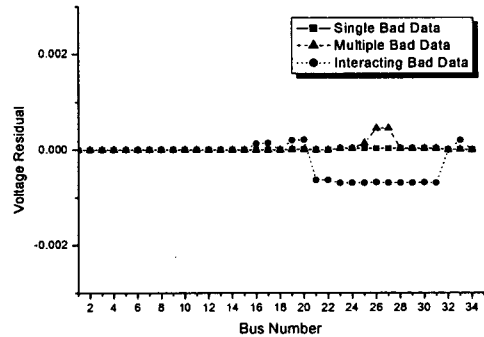


그림 7. 불량데이터에 대한 전압크기 오차

3. 결 론

복합배전계통 조류계산 및 상태추정에 대한 기초연구로서 본 논문에서는 분산전원의 연계로 계통손실의 감소 효과를 조류계산기법을 사용하여 검사하였으며, 전압보상 효과도 확인하였다. 또한 복합배전계통에 대한 상태추정기의 수렴성 및 불량데이터의 강건성을 확인하였다. 향후 선로의 불평형을 고려한 3상 복합배전계통 조류계산 및 상태추정에 대한 개발 연구를 통하여 복합배전계통 계획 및 운용에 유용한 수단으로 사용할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었음. (관리번호: 01-jung-04)

(참 고 문 헌)

- (1) IEEE Distribution Planning Working Group Report, "Radial Distribution Test Feeder," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991.
- (2) William H. Kersting, W. Howard Phillips, "Distribution Feeder Line Models," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 2, July/August 1995.
- (3) Ali Abur, "A Bad Data Identification Method for Linear Programming State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp.894-901, 1990.
- (4) R. Zivanovic, "An Algorithm for Bad Data Processing in a Linear Programming Based State Estimation," IEEE/KTH stockholm Power Tech Conference, pp. 158-163, 1995.