

복합배전계통에서 계통손실을 고려한 분산형 전원의 위치선정 및 상태추정

권형석¹ · 김홍래^{2*}

Optimal Placement of Distributed Generations Considering System Losses and State Estimation in Composite Distribution Systems

Hyung-Seok Kwom¹ and Hongrae Kim^{2*}

요약 전력 소비자 근처에 설치, 운영하는 소규모 발전 형태인 분산형 전원에 대한 관심이 최근 들어 커지고 있다. 전력산업 구조개편이 진행되고 있는 현 상황에서 분산형 전원을 배전계통 내에 설치하고, 배전계통의 상태추정 기법을 적용하여 배전계통 운영을 안정적이고 신뢰성 높게 하려는 시도가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 배전계통에 분산형 전원을 추가하였을 때 계통 손실에 미치는 영향을 분석하여 분산형 전원의 최적위치를 선정하고, 분산형 전원이 포함된 배전계통을 위한 상태추정 기법을 개발하였다. 불량데이터에 대한 강건성이 뛰어난 WLAV 상태추정기를 구현하였으며, 단일, 다중, 상호작용 불량 데이터에 대한 테스트를 실시하였다. IEEE 34 모선 수지상 계통을 사용하여 사례연구를 수행함으로써 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

Abstract Recently, it is increasing the concern of distributed generations(DGs) that installed small power at a site near by the customer. In deregulation environment, not only distributed generation operation but also state estimation is the key function in distribution systems. This paper process to calculate the impact of distributed generation on a distribution feeder. WLAV state estimation is performed the distribution systems with DGs and bad data test including single, multiple, interacting. Simulations with test cases are performed and the results are presented, using IEEE 34 bus radial distribution systems

Key Words : State estimation, Distributed generations, Distribution systems

1. 서론

최근 산업의 고도화와 에너지 공급 여건의 악화때문에 전력수급의 안정화에 대한 대책이 시급하다. 그 일환으로서 이를 위해 기존의 발전형태와는 다른 대체에너지를 포함한 다양한 형태의 분산형 전원의 보급이 확대되어야 할 것이다. 분산형 전원은 연료전지, 풍력발전, 태양광발전, 소형열병합발전과 같은 소규모의 발전시스템을 의미한다. 이러한 전원은 소형화가 가능하고 환경친화적이며 비상전원(back-up generation)으로서의 활용성이 높다. 이러한 소규모 전원을 배전계통과 연계하

는 것이 효율적인 대책의 하나일 것이다. 그림 1과 같은 분산형 전원이 연계된 배전계통을 복합배전계통(composite distribution systems)이라 한다.

분산형 전원을 포함하는 전력계통을 구성하면, 송배전 건설비용을 절감할 수 있으며, 전압 보상과 손실 감소에 유리하고, 또한 재생 에너지원의 사용으로 환경오염을 줄일 수 있다. 그러나 배전계통의 전압조정 및 변동 문제, 고조파, 고립운전, 전력품질 저하, 단락용량증가, 보호협조 등에 관한 문제점이 해결되어야 하므로, 이러한 문제점에 대한 연구가 진행 중에 있다.

전력계통 상태추정은 1969년 Fred Schweppe에 의해 처음으로 전력계통에 응용되기 시작하였다[1]. 상태추정은 EMS내에서 전력계통의 안정된 운영을 위하여 사용되는 중요한 기능중 하나이다[2, 3]. 상태추정의 주요 기능은, 측정데이터로부터 에러를 여과하고(data purifier) 계통의 상태(voltage profile)를 추정함으로써 현재 계통

이 논문은 2002년 순천향대학교 산업기술연구소 학술연구소 학술조성비 일반연구과제 지원에 의하여 연구되었음.

¹순천향대학교 전기전자공학과

²순천향대학교 정보기술공학부

*교신저자: 김홍래(hongkim@sch.ac.kr)

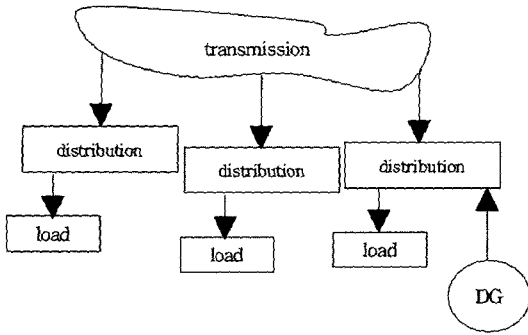


그림 1. 분산형 전원이 포함된 복합배전계통

에 대한 정확한 데이터베이스를 구축하는 것으로서, 그동안 다양한 연구와 개발이 이루어져 왔다[4-7].

조류계산이나 상태추정 프로그램은 일반적으로 송전계통을 대상으로 개발된 것으로, 계통의 운용상황이나 구조 등의 차이 때문에 배전계통 특히 분산형 전원이 도입된 복합배전계통에 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 배전계통을 위한 조류계산 및 상태추정 기법을 개발하여야 한다[8, 9].

분산형 전원이 연계된 배전계통의 신뢰도, 고립운전 등 여러 기술적인 부분에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 계통 확장비용을 최소화하거나 유전자 알고리즘을 사용하여 계통의 비용 절감을 통한 분산전원의 위치 선정 및 용량을 결정하는 연구들이 있었다. 본 논문에서는 조류계산을 사용하여 계통 손실을 계산하고 분산형 전원의 위치를 손실을 최소화 하는 곳으로 결정하였다. 또한 복합배전계통의 실시간 운영을 가정하고 WLAV 상태추정을 수행하였다. 분산형 전원이 연계된 복합배전계통에 대한 WLAV 상태추정기의 수렴성, 불량데이터에 대한 강건성을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 분산형 전원

기존의 배전계통은 수직상 구조로 되어있으며 변전소 이후 최종 소비자에 이르기까지 전원이 없이 설계되었다. 따라서, 분산형 전원의 배전계통 연계 시 전력조류와 전압의 변화가 나타나고 이와 같은 상황 하에서 배전계통의 상태나 분산형 전원의 특성에 따라 긍정적이거나 부정적인 영향의 감소, 전압보상 및 전력공급의 신뢰도 향상과 같은 장점을 얻을 수 있다. 그러나 다른 한편으로는 전압변동, 고조파, 전력품질 저하, 고조파 단락용량의 증대와 같은 부정적인 영향도 간과할 수 없다. 분산형 전원은 비전기사업자의 소유가 대부분이고

태양광이나 풍력발전과 같은 가변 에너지원으로 인하여 항상 같은 상태의 복합배전계통 운용이 불가능한 문제점도 가지고 있다.

2.2 전력계통 상태추정

최근 우리나라의 전력수요는 도시의 개발이나 산업의 발전, 생활여건의 향상 등에 따라 지속적으로 증가하고 있다. 이런 대형, 복잡화되고 있는 전력계통의 실시간 감시, 분석 및 제어를 위하여 EMS(Energy Management System)가 사용되고 있으며, 이 EMS는 현대의 전력계통 운용에 있어서 가장 중요한 역할을 하는 계통운용 설비 중의 하나이다. 상태추정 기법은 이러한 EMS 내에서 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.

상태추정의 수학적 모델은 계통 내에서 측정된 데이터와 상태벡터 간의 관계에 기초하여 다음과 같은 측정벡터 z 의 식으로 쓸 수 있다[10].

$$z = h(x) + e \quad (1)$$

여기서, x : 계통 상태벡터,
 $h(x)$: 비선형 측정함수,
 e : 측정오차벡터.

식 (1)에서 사용된 오차벡터 e 는 평균이 0이며 가우시안(Gaussian) 분포를 가지는 독립 랜덤 변수들의 벡터로 가정한다. 이때, 측정에러 e_i 의 분산 σ_i^2 은 측정값의 정확도를 표시하게 되므로, 분산이 작은 값이면 그 측정값은 정확한 것이고 분산이 큰 값을 가지면 그 측정값은 상대적으로 덜 정확한 것으로 간주한다.

상태추정기가 갖추어야 할 가장 중요한 특성은 상태추정의 결과가 통계적으로 강건성(statistical robustness)을 가져야 한다는 것과 온라인 수행을 위해 계산의 효율성(computational efficiency)을 가져야 한다는 것이다.

2.2.1 WLS 상태추정

WLS 상태추정에서는 여러 가지 측정데이터의 실제 측정값과 추정값들 간의 오차를 최소화하기 위하여 다

음과 같은 2차 목적함수를 사용한다.

$$J(x) = \{z - h(x)\}^T R^{-1} \{z - h(x)\} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} \{z_i - h_i(x)\}^2 \quad (2)$$

목적함수 $J(x)$ 를 최소화하기 위한 최적조건은 다음의 식(3)과 같으며, 이 식에서 $H(x)$ 는 측정함수의 자코비안 행렬로 $\partial h(x)/\partial x$ 를 계산함으로써 구할 수 있다.

$$\partial J/\partial x = H^T(x)R^{-1}\{z - h(x)\} = 0 \quad (3)$$

비선형 측정함수 $h(x)$ 를 테일러 급수로 전개하고 이차항이상의 고차항을 제거함으로써 다음과 같은 선형함수로 근사화할 수 있다.

$$h(x) \cong h(x^k) + H(x^k)(x - x^k) \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하면 다음의 정규방정식(normal equation)을 구할 수 있으며, 반복계산법(iterative method)을 사용하여 이 방정식의 해를 구함으로써 최소자승 추정치를 구할 수 있다.

$$H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)\Delta x^k = H^T(x^k)R^{-1}\{z - h(x^k)\} \quad (5)$$

식 (5)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta x^k = \{G(x^k)\}^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k \quad (6)$$

여기서, $\Delta x^k = x - x^k$
 $G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$,
 $\Delta z^k = z - h(x^k)$.

식 (6)을 이용하여 상태벡터는 다음과 같이 갱신되며, 갱신된 상태벡터가 정해진 수렴오차 내에 들어오면 ($|\Delta x^k| < \epsilon$) 그 값을 최적 상태벡터 \hat{x} 로 결정한다.

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (7)$$

2.2.2 WLAV 상태추정

본 논문에서 사용할 WLAV 상태추정기의 목적함수는 다음과 같이 정의되며, 이 함수를 최소화하는 x 가 현재 계통의 상태를 나타낸다.

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i |z_i - h_i(x)| \quad (8)$$

식 (8)의 목적함수는 다음의 선형계획 문제를 반복 계산함으로써 최소화할 수 있다[11].

$$\min J(x) = \sum_{i=1}^m \omega_i \cdot (u_i + v_i) \quad (9)$$

$$s.t. \Delta z^k = H(x^k) \cdot \Delta x^k + u - v \quad (10)$$

여기서, $\Delta z^k = z - h(x^k)$,
 $H(x^k) = \partial h/\partial x$ at $x = x^k$,
 $\omega_i = i$ 번째 측정값의 측정 가중치,
 $u, v =$ 음이 아닌 잉여변수(slack variables).

WLAV 상태추정기는 그 특성상 계산결과에 대한 불량데이터의 영향은 식 (9)와 (10)의 계산과정에서 자동적으로 제거되고 정확한 측정데이터만으로 상태추정을 수행하게 된다. 따라서 상태추정이 완료된 후 계산한 잉여오차가 허용한계보다 큰 측정데이터와 관련되어 있는 계통 파라미터에는 예러가 포함되었음을 의심할 수 있다.

2.3 선로 모델링

배전계통은 송전계통과 달리 3상간의 부하가 균등하게 배분되어 있지 않거나, 지속적인 연가가 이루어지지 않고 있다. 본 논문에서는 배전계통의 3상 선로 임피던스의 대칭성분 중 정상분 임피던스를 사용하여 조류계산 및 상태추정을 실시하였다. 3상 가공선로와 전압강하 방정식은 각각 그림 2와 식 (11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)과 같은 전압강하 방정식에서 선로 임피던스는 Carson 방정식을 이용하여 선로의 임피던스를 계산

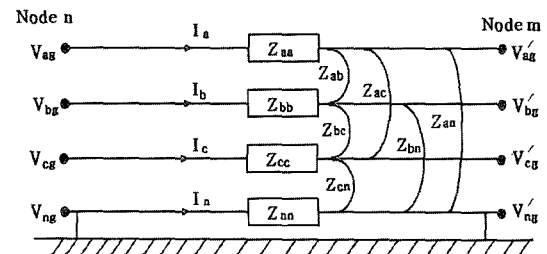


그림 2. 3상 4선식 배전계통

할 수 있다[12]. 식 (11)에서 중성선 전압(V_{ng})을 영(zero)으로 가정하면, Kron 소거법에 의하여 4×4 임피던스 행렬을 중성선의 영향을 포함한 식(12)와 같이 3×3 임피던스 행렬로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. 사례연구

그림 3에서와 같이 IEEE 34모선 시험계통을 사용하여 사례연구를 실시하였다. 선로 및 부하 데이터는 표 1, 표 2, 그리고 표 3에 정리하였다. 본 논문에서는 시험계통의 선로 임피던스의 대칭성분 중 정상분만을 사용하였으며 A상에 대한 부하용량을 사용하였다.

IEEE 34 모선 시험계통의 슬랙 모선을 제외한 각 모선에 50~300kW의 분산형 전원을 투입하여 각 모선의 유효전력 손실을 계산한 결과가 그림 4와 같다. 34 모선에 300kW의 분산형 전원이 연계되었을 경우 연계하지 않은 경우보다 약 72.2%의 손실이 감소하였다. 따라서 34번 모선이 IEEE 34 모선 시험계통에서 분산형 전원의 최적 위치라 판단 할 수 있다. 그림 5는 분산형 전원의 투입 전(前)과 투입 후(後)의 전압의 변화를 나타내고 있다. 대부분의 모선에서 전압이 상승하였고, 특히 부하가 편중되어 있는 20번 모선 이후의 전압이 크게 상승하였음을 알 수 있다.

34번 모선에 분산형 전원이 투입된 복합배전계통의 운영을 가정하여 상태추정을 실시하였다. WLAV 상태 추정기의 강건성을 확인하기 위하여 표 4와 같이 단일 불량데이터, 다중 불량데이터, 상호작용 불량데이터를 가정하여 불량데이터 테스트를 실시하였다. 그림 6에서와 같이 WLAV 상태추정기는 단일, 다중, 상호작용 불량데이터에 대하여 약 이내의 오차를 가지고 수렴하였으며 불량데이터에 충분히 강건성을 가지고 있다고 판단할 수 있다.

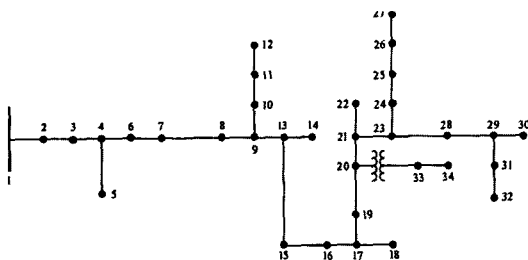


그림 3. IEEE 34 모선 시험계통

표 1. IEEE 34 모선 시험계통 선로 데이터

시작 모선	끝 모선	선로 길이(mile)	선로배치 코드
1	2	0.4902	301
2	3	0.3287	301
3	4	6.1237	301
4	5	1.10276	303
4	6	7.125	301
6	7	5.6487	301
9	10	0.3249	302
9	13	1.9399	301
10	11	9.1485	302
11	12	2.6106	302
13	14	0.5757	303
13	15	0.1596	301
15	16	3.8836	301
16	17	0.0988	301
20	21	0.931	301
23	28	0.3838	301
23	24	0.0532	301
29	30	0.1634	301
29	31	0.0532	301
24	25	0.2565	301
25	26	0.6916	301
26	27	0.1007	301
8	9	0.0589	301
17	18	4.4327	303
17	19	6.9977	301
21	22	0.3078	303
21	23	1.1077	301
28	29	0.5092	301
31	32	0.9234	304
33	34	2.0064	300

표 4. 불량데이터 종류

단일 불량데이터	21-22번모선 조류전력
다중 불량데이터	21-22번모선 조류전력 28-29번모선 조류전력
상호작용 불량데이터	1번모선 주입전력 2-3번모선 조류전력

표 2. IEEE 34 모선 시험계통 부하 데이터

Bus Number	P_L (kW)	Q_L (kVAR)
11	34	17
12	135	70
16	17	8
21	7	3
22	2	1
23	4	2
25	144	110
27	20	16
28	36	24
29	30	15
30	27	16
34	150	75
Total	606	357

표 3. IEEE 34 모선 시험계통 선로 분류

	선로배치 코드	상순서 (Phasing)	상 (Phase)	중성선 (Neutral)
			ACSR	ACSR
가공 선로	300	BACN	1/0	1/0
	301	BACN	#2 6/1	#2 6/1
	302	AN	#4 6/1	#4 6/1
	303	BN	#4 6/1	#4 6/1
	304	BN	#2 6/1	#2 6/1
선로 종류	GMR(feet)	저항(Ω /mile)		
1/0	0.00046	1.12		
#2 6/1	0.00418	1.69		
#4 6/1	0.00437	2.57		

4. 결 론

분산형 전원의 배전계통 연계는 기술적인 측면뿐 아니라 사회 경제적인 측면에서도 기존의 계통 운영보다 효율적이다.

본 논문에서는 분산형 전원의 배전계통 연계에 대한 평가 및 복합배전계통 조류계산 및 상태추정에 대한 기초연구로서, IEEE 34 모선 시험계통에 분산형 전원을 연계하여 계통 손실의 감소효과를 조류계산을 이용하여 검사하였고 약 72%정도의 손실 감소 효과를 보았으며,

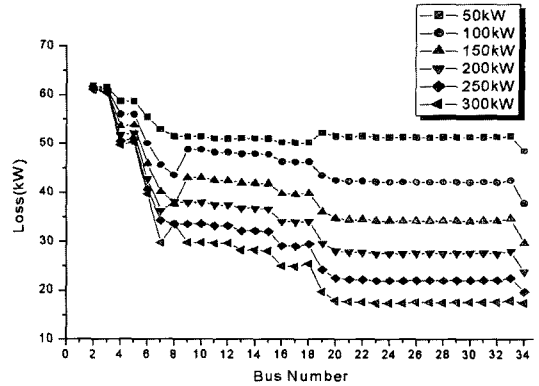


그림 4. IEEE 34모선 시험계통 모선별 선로 손실

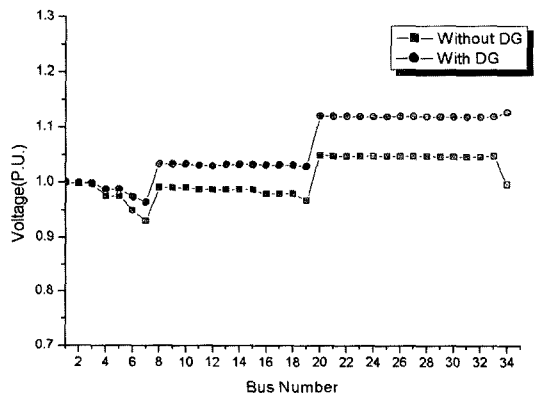


그림 5. 분산형 전원 투입 전·후에 따른 전압

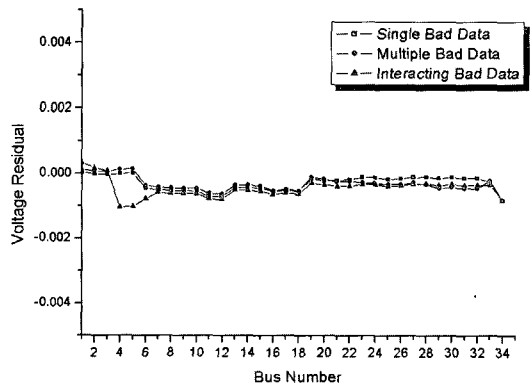


그림 6. IEEE 34 모선 시험계통 전압크기 오차

전압보상 효과도 확인하였다. 또한 복합배전계통에 단일, 다중, 상호작용 불량데이터를 가정하여 불량데이터 테스트를 실시하였고 불량데이터에 대하여 본 논문에서 개발한 WLAV 상태추정기는 약 10^{-3} 이내의 오차를 가지고 수렴하였으며 불량데이터에 충분히 강건성을 가지고 있다고 판단할 수 있다. 본 논문을 통하여 분산형 전원 및

복합배전계통 해석에 관한 기초적인 틀이 마련되었다.

향후 선로의 불평형을 고려한 3상 복합배전계통 조류계산 및 상태추정에 대한 개발 연구를 통하여 복합배전계통 계획 및 운용에 유용한 수단으로 사용할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- [1] F.Schwepe and J. Wildes, "Power System Static State Estimation, Part I: Exact Model", IEEE Trans. on Power Appar. & Syst., Vol. PAS-89, No. 1, pp. 120-125, 1970.
- [2] T. Dy Liacco, "The Role and Implementation of State Estimation in an Energy Management System", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 75-79, 1990.
- [3] F. Wu, "Power System State Estimation: A Survey", Electrical Power & Energy Systems, Vol. 12, No. 2, pp. 80-87, 1990.
- [4] M. Filho, A. Silva and D. Falcao, "Bibliography on Power System State Estimation (1968-1989)", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 950-961, 1990.
- [5] L. Holten, et al., "Comparison of Different Methods for State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1798-1806, 1988.
- [6] A. Monticelli and A. Garcia, "Fast Decoupled State Estimator", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 2, pp. 556-564, 1990.
- [7] A. Abur and M. Celik, "A Fast Algorithm for the Weighted Least Absolute Value State Estimation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, pp. 1-8, Feb. 1992.
- [8] F. Wu and A. Neyer, "Asynchronous Distributed State Estimation for Power Distribution System", Proc. of 10th Power Systems Computations Conference, pp. 439-446, Graz, Austria, 1990.
- [9] I. Roytelman and S. M. Shahidehpour, "State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, pp. 2009-2015, 1993.
- [10] A. Abur and A. Exposito, Power System State Estimation, Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [11] Bernard Kolman, Robert E. Beck, Elementary Linear Programming with Applications, Academic Press, 1995.
- [12] William H, Kersting, W. Howard Phillips, "Distribution Feeder Line Models", IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 131, No. 2, July/August 1995.