

부하 중심점 개념의 전력 시스템 정태 등가 축약

백수열, 김정훈, 심건보, 이봉용
홍익대학교 공과대학 전기·제어 공학과

Load Center Concept Equivalent by T/L Loss Identification

Baek Soo-Youl, Kim Jung-Hun, Shim Keon-Bo, Lee Bong-Yong
Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control Engr.

Abstract

A simple and practical equivalent technique has been presented in this study. Arbitrary number of bus system can be aggregated to the equivalent one-bus system. equivalents are total real, and reactive bus powers and T/L losses viewing from boundary buses.

Variables to be determined are line impedance between boundary buses and the equivalent bus, voltage and angle of that bus.

IEEE 14 bus system is used to demonstrate the proposed method. even in contingency cases very good results have been obtained

1. 서론

대규모의 전력 시스템 해석에서 종종 전시스템이 아닌 부분적인 시스템의 상태에만 관심을 갖는 경우가 발생된다. 전력시스템 시뮬레이터를 사용하는 경우, 경제성이나 효율성 면에서 문제가 있으며 관심 대상을 벗어난 지역에 대해서는 시스템을 축약하여 표시하여야 한다. 이외에도 부분 시스템에 대한 빈번한 디지털 시뮬레이션이 요구되는 경우에도 계산시간면에서 시스템 축약의 필요성이 요구된다. 시스템 계층화에 따라 관리대상 시스템은 상세한 모니터링에 의해 충분한 지식을 얻을 수 있으나 관리 비대상 시스템에 대한 지식은 충분히 얻기가 불가능하여 이를 단순화할 필요가 있게 되었다.

이러한 필요성들에 의해 관심 대상에서 벗어나는 시스템을 외부 등가 모선으로 단순화 시키려는 시도가 많이 수행되었다. 이에 따른 대표적인 방법으로서 가우스 소거법으로 직접 시스템을 축약하는 WARD[1~4] 방법과 가상의 모선에 제거되는 모선의 전력을 집약하는 REI 방법[5~6]이 있다. 시스템 등가 축약의 요건은[7~11]

- 등가화에 의한 내부시스템상태에의 영향이 거의 없을 것
- 내부시스템 상정사고의 경우에도 이 영향은 국소화될 것
- 외부 등가 시스템은 내부시스템에서 볼 때 등가 이전과 동일할 것 이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 이상의 조건을 만족하는 단순하면서도 새로운 방법을 제시 하였다. 내부 시스템으로부터 외부 시스템을 볼 때, 쉽게 알 수 있는 것은 외부 시스템의 부하와 송전 손실이라는 점으로부터 송전손실 상태식별법에 의한 등가 시스템 축약법이 제안되었다.

2. 외부 등가 시스템 축약

외부 시스템이 어떤 부하 중심점에 모여 있고 유효 전력과 무효 전력이 그 중심점에 집중되어 있다고 하자. 그리고 경계모선에서 보는 그 부하 중심점까지의 송전 손실까지 동일하다고 하면, 경계모선에서 보는 외부 시스템은 한점에 집중되어 있거나 여러 모선으로 분산되어 있거나에 상관 없이 동일한 시스템으로 여길 수 있다. 즉 외부 시스템의 등가 시스템 축약이 이루어진 것이다.

다만 경계모선으로부터 등가 시스템 모선까지의 회로정수는 변화될 수 있으며, 이 정수는 구해져야 한다.

그림 1은 이 때의 개념도를 보인 것이다.

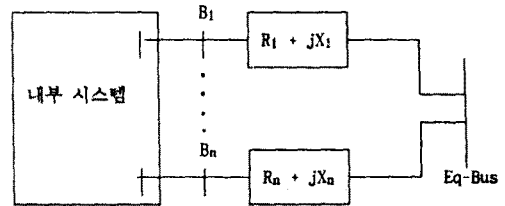


그림 1. 등가 시스템 개념도

그림 1에서, B_i 는 경계모선이고, 등가모선 Eq 는 외외부 시스템의 등가 축약 모선으로서 모든 유효전력과 무효전력 부하, 그리고 발전기까지 모두 하나의 모선에 연결되어 있다. 그리고 경계모선으로부터 외부에 대하여 회로 정수, 등가모선의 전압 크기 및 위상이 결정되어야 하며, 이때 만족해야 할 조건은 경계모선에서 외부모선에 대한 송전 손실과 전력의 변화가 없어야 한다.

일반적으로 n 개모선 시스템에 대하여

$$\begin{aligned} P_i &= f_i(V, \delta, R, X) \\ Q_i &= g_i(V, \delta, R, X) \end{aligned} \quad (1)$$

$i = 1 \dots n$
 V, δ : 모선전압, 위상각 벡터
 R, X : 선로저항 및 리액턴스

이 성립한다.

그런데, 내부 시스템은 외부 시스템으로 인하여 영향을 받지 아니하므로, 외부 등가시스템은 경계모선을 포함하는 외부측에 대하여

$$\begin{aligned} P_{bi} &= f_{bi}(V_{bi}, V_{eq}, \delta_{bi}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}) \\ Q_{bi} &= g_{bi}(V_{bi}, V_{eq}, \delta_{bi}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} P_{eq} &= f_{eq}(V_{bi}, V_{eq}, \delta_{bi}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}) \\ Q_{eq} &= g_{eq}(V_{bi}, V_{eq}, \delta_{bi}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}) \end{aligned} \quad (3)$$

의 관계가 성립한다.

V_{bi}, δ_{bi} 는 상수이며 다른 값은 구해져야할 변수들이다.

3. 송전손실 상태식별법에 의한 외부등가모델의 수식화

앞절에서 언급한 $V_{eq}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}$ 를 결정하기 위하여 송전손실 상태식별법을 도입한다면 다음과 같다.

송전손실 P_L^* 에 대하여

$$\begin{aligned} & (P_L^* - P_L(V_{eq}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}))^2 \\ & + (Q_L^* - Q_L(V_{eq}, \delta_{eq}, R_{eqi}, X_{eqi}))^2 = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

P_L^*, Q_L^* : 등가화 할 외부 시스템 선로의 송전손실 합
 $P_L(V, \delta, R_i, X_i), Q_L(V, \delta, R_i, X_i)$: 축약 시스템의 총 송전손실로서 다음에 의해 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_L &= -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i^2 G_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n V_i V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \\ Q_L &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i^2 B_{ij} - \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n V_i V_j B_{ij} \cos \delta_{ij} \end{aligned} \quad (5)$$

n : 경계모선 수

식(4)를 만족하는 V, δ, R_i, X_i 를 얻기 위하여 헷식은

$$\min L = (P_L^* - P_L(V, \delta, R, X))^2 + (Q_L^* - Q_L(V, \delta, R, X))^2 \quad (6)$$

와 같이 지정값과 계산값의 차를 최소화하는 최적화 문제로 바꿔 표현할 수 있다.

전력조류 계산을 통해 시스템의 상태를 결정하는 것이 일반적이거나 시스템의 상태정보를 내포하고 있는 송전손실을 사용하여 시스템의 상태인 전압의 크기와 위상각, 회로정수를 구할 수 있다.

4. 알고리즘

4.1. 정식화

송전손실 상태식별법을 이용하여 원래의 시스템을 등가모델로 표현하기 위한 목적함수는 다음과 같다.

$$L = (P_L^* - P_L(V, \delta, R_i, X_i))^2 + (Q_L^* - Q_L(V, \delta, R_i, X_i))^2 \quad (7)$$

subject to

$$\begin{aligned} \sum P_o^* - P_o &= 0 \\ \sum Q_o^* - Q_o &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

P_o^*, Q_o^* : 등가화 할 원래 시스템의 P, Q

P_o, Q_o : 등가모선의 P, Q

우리의 목적은 원래 시스템의 송전손실과 등가시스템의 송전손실을 같게 맞추는 것이 목적이므로 목적함수는

$$\begin{aligned} \min L &= \\ & (P_L^* - P_L(V, \delta, R_i, X_i))^2 + (Q_L^* - Q_L(V, \delta, R_i, X_i))^2 \\ & + \lambda_p (\sum P_o^* - P_o) + \lambda_q (\sum Q_o^* - Q_o) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

와 같고 뉴턴법에 의해

$$VL(V, \delta, R_i, X_i) = 0$$

$$\begin{aligned} & = -2(P_L^* - P_L(V, \delta, R_i, X_i)) \frac{\partial P_L}{\partial(V, \delta, R_i, X_i)} \\ & = -2(Q_L^* - Q_L(V, \delta, R_i, X_i)) \frac{\partial Q_L}{\partial(V, \delta, R_i, X_i)} \end{aligned} \quad (10)$$

이고, 헷식은 비선형 방정식이므로 테일러 급수 전개를 하면

$$\begin{aligned} VL(V^0 + \Delta V, \delta^0 + \Delta \delta, R_i^0 + \Delta R_i, X_i^0 + \Delta X_i) &= \\ VL(V^0, \delta^0, R_i^0, X_i^0) + VL^2(V, \delta, R_i, X_i) \cdot \Delta(V, \delta, R_i, X_i) & \\ = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta(V, \delta, R_i, X_i) &= - \frac{VL(V^0, \delta^0, R_i^0, X_i^0)}{VL^2(V, \delta, R_i, X_i)} \\ &= - [H]^{-1} \cdot VL \end{aligned} \quad (12)$$

과 같이 표현될 수 있고 V, δ, R_i, X_i 를 갱신하여 minimize L을 만족하는 $V^*, \delta^*, X_i^*, R_i^*$ 를 얻을 수 있다.

4.2. 등호 제약조건의 고려

송전손실과 더불어 외부의 전력을 맞추기 위해 다음의 구속조건을 이용한다.

$$\begin{aligned} \sum P_o^* - P_o &= 0 \\ \sum Q_o^* - Q_o &= 0 \end{aligned}$$

앞에서 갱신된 V, δ, R_i, X_i 중 V, δ 를 이용하여 Jacobian을 구성하면

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

V, δ 를 갱신함으로써 $\sum P_o^* - P_o = 0$ 와 $\sum Q_o^* - Q_o = 0$ 를 만족하는 V, δ 를 얻을 수 있고 앞에서 얻은 R_i, X_i 와 함께 목적함수를 minimize하기 위해 갱신된다.

4.3. 계산 순서

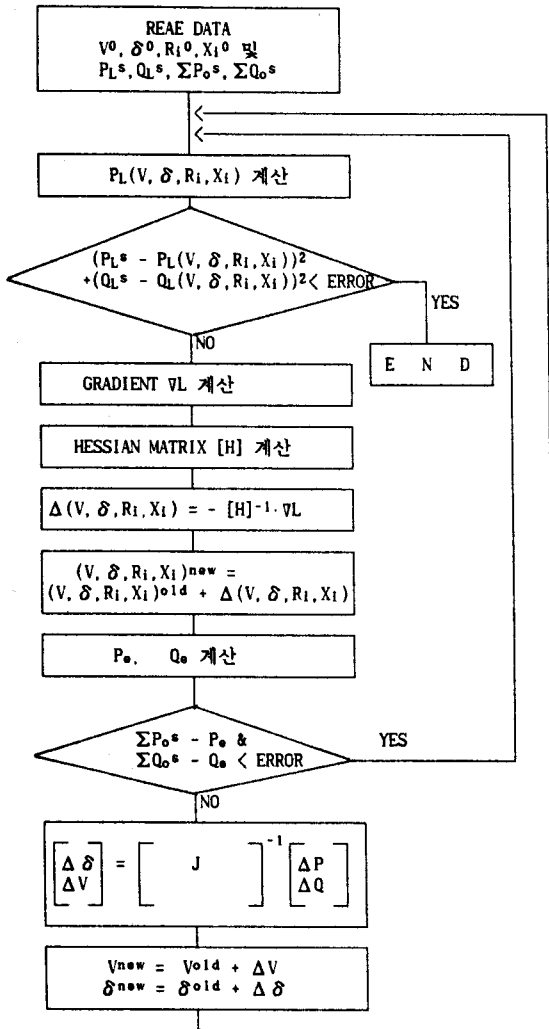


그림 2. 계산 흐름도

5. 사례 연구

IEEE 14 BUS system을 등가 10BUS으로 축약하여 결과를 비교해 보았고 또한 상정사고의 결과를 비교해 보았다.

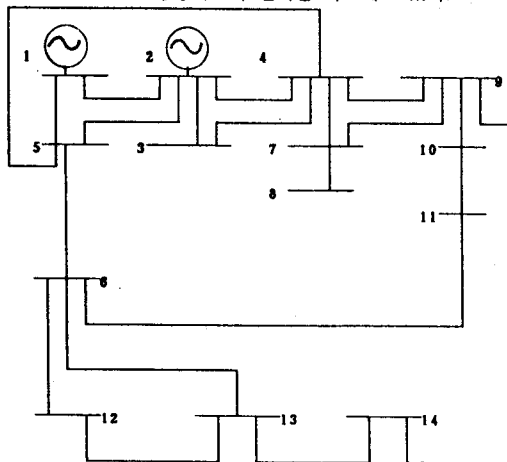


그림 3(a) 14모선도

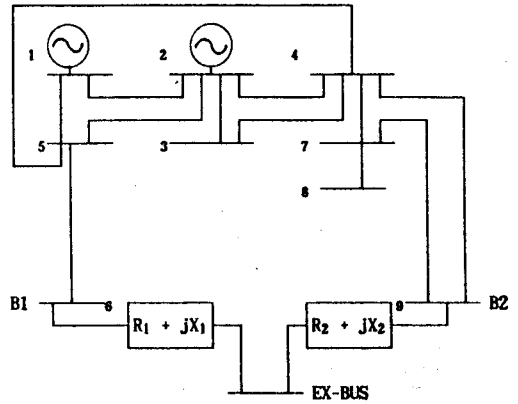


그림 3(b) 14모선도

계산 결과의 등가 시스템은 표 1과 같다.

표 1. 등가 시스템

구분	초기값	결과값
V_{0q}	1.00000	1.02665
δ_{0q}	-0.26000	-0.27501
R_{0q1}	0.10000	0.06111
X_{0q1}	0.20000	0.12218
R_{0q2}	0.12700	0.01348
X_{0q2}	0.30000	0.03313

이 결과는 반복횟수 10회 $\epsilon = 0.001$ 인 경우를 나타낸 것이다.

표 2. 기준 CASE의 비교

LINE NUMBER	전시스템(14BUS)		등가시스템(10BUS)	
	P	Q	P	Q
1 2	1.56087	-0.14285	1.56383	-0.14355
2 3	0.72646	0.08402	0.72829	0.08384
2 4	0.55930	-0.02818	0.56279	-0.02713
1 5	0.76383	0.03096	0.76262	0.03059
2 5	0.41561	-0.02995	0.41308	-0.02991
3 4	-0.23841	0.01712	-0.23669	0.01830
4 5	-0.61627	0.05837	-0.64103	0.05658
5 6	0.44514	-0.11733	0.41644	-0.11999
4 7	0.28220	-0.08140	0.30142	-0.07948
7 8	-0.00025	-0.26522	-0.00019	-0.26795
4 9	0.15645	0.00393	0.16706	0.00552
7 9	0.28245	0.16632	0.30161	0.16875

표 2는 전시스템과 등가 시스템의 기준 CASE에 대한 선로조류를 비교한 것이며 양자간에 별 차이가 없음이 확인된다. 즉, 축약시스템의 등가임이 입증된 것이다.

표 3. LINE 2-5 OUTAGE

LINE NUMBER	전시시스템(14BUS)		등가시스템(10BUS)	
	P	Q	P	Q
1 2	1.41058	-0.10698	1.41461	-0.10795
2 3	0.81577	0.07592	0.81709	0.07581
2 4	0.74320	-0.04485	0.74569	-0.04401
1 5	0.92338	0.04476	0.92087	0.04381
3 4	-0.15497	0.00430	-0.15375	0.00517
4 5	-0.37246	0.00999	-0.40162	0.00847
5 6	0.43214	-0.13775	0.40040	-0.14018
4 7	0.29050	-0.09191	0.31158	-0.09037
7 8	-0.00037	-0.27354	-0.00027	-0.27514
4 9	0.16098	-0.00057	0.17262	0.00059
7 9	0.29087	0.16266	0.31185	0.16325

표 4. LINE 4-5 OUTAGE

LINE NUMBER	전시시스템(14BUS)		등가시스템(10BUS)	
	P	Q	P	Q
1 2	1.77356	-0.19129	1.77513	-0.19163
2 3	0.89255	0.07020	0.89219	0.07022
2 4	0.89508	-0.03020	0.89448	-0.03076
1 5	0.57689	0.01190	0.57922	0.01238
2 5	0.11389	0.00580	0.11632	0.00603
3 4	-0.08379	0.01865	-0.08413	0.01811
5 6	0.59808	-0.06762	0.60268	-0.06754
4 7	0.18678	-0.10346	0.18621	-0.10392
7 8	-0.00043	-0.30631	-0.00034	-0.30516
4 9	0.10328	-0.00098	0.10296	-0.00146
7 9	0.18721	0.19339	0.18655	0.19181

표 5. LINE 9-Eq OUTAGE

LINE NUMBER	전시시스템(14BUS)		등가시스템(10BUS)	
	P	Q	P	Q
1 2	1.55454	-0.14137	1.55630	-0.14178
2 3	0.71936	0.08473	0.71966	0.08470
2 4	0.54486	-0.02772	0.54544	-0.02762
1 5	0.77393	0.03660	0.77501	0.03679
2 5	0.43116	-0.02565	0.43194	-0.02549
3 4	-0.24507	0.01710	-0.24479	0.01721
4 5	-0.49284	0.06235	-0.49206	0.06258
5 6	0.59454	-0.10323	0.59707	-0.10307
4 7	0.18963	-0.08251	0.18967	-0.08259
7 8	-0.00023	-0.26633	-0.00018	-0.26645
4 9	0.10514	0.00359	0.10515	0.00356
7 9	0.18986	0.17516	0.18985	0.17518

등가시스템은 상정사고의 경우에도 성립되어야 하는바, 표 3~5는 그러한 예를 보여준다. 어느 경우이나 축약시스템의 등가임이 충분히 입증되고있다

6. 결 론

매우 단순하면서도 범용성이 높은 등가시스템 축약법을 제안한 본 연구의 주요내용은 다음과 같다.

- 1) 송전선실과 부하가 동기화에서도 동일하다는 단순한 등가 시스템축약의 개념을 제시하였다.
- 2) 송전선실 상태식별법에 의하여 등가 시스템의 변수가 결정되었다.
- 3) 사례연구에서 제시된 방법은, 상정사고를 포함하는 모든 경우에 충분히 등가임을 입증하였다.
- 4) 제시된 방법은 일반적으로 아무리 복잡한 시스템에 대해서도 적용가능하며, 급후 보다 대형시스템에 대하여 연구하고자 한다.

7. 참 고 문 헌

[1] W.F.Tinney et al, "Sparsity Oriented Network Reduction," Proc. 1973 PICA Conference, June, 1973, pp.384-390

[2] L.Ferreira, "A Network-Based Approach to Power System Security Assessment and Control", Ph.D.Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Jan, 1986.

[3] A Monticelli & S.Deckmann "Real-Time External Equivalents for Static Security Analysis", IEEE Trans on PAS, vol.PAS-98, March/April, 1989.

[4] R.A.m. van Amerongen & H.P. van Meeteren, "A Generalised Ward Equivalent for Security Analysis", IEEE Trans on PAS, vol.PAS-101, June, 1982.

[5] P.Dimo, et al, "The REI Equivalent - A General Model for the Analysis of power System Behaviour", Rapp. CIGRE 32-16, 1974.

[6] Michael L. Oatt, Sam R.Erwin, Jack L.Hart, "Application of the REI equivalent for operation Planning Analysis of Interchange schedules", IEEE Trans on PS, vol.5, May, 1990.

[7] E.C.Housos & G.Irisarri & R.M.Porter & A.M.Sasson, "Steady State Network Equivalents For Power System Planning Applications.", IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-99, No. 6, Nov/Dec, 1980.

[8] A.Monticelli & Felix F.Wu, "A Method That Combines Internal State Estimation and External Network Modeling.", IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-104, No.1, January 1985.

[9] R.D.Shultz & R.A.Smith & R.A.Stevens, "Incorporation of Linearized Sensitivities In The Ward Method.", IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-102, No.5, May, 1983.

[10] Kenneth I.Geisler & Nand K. Tripathi, "State Estimation Based External Network Solutions : Field Testing.", IEEE Trans on PAS, Vol.PAS-104, No.8, August, 1985.

[11] C.N.Lu & K.C.Liu & S.Vemuri, "An External Network Modeling Approach For On-Line Security Analysis.", IEEE Trans on PS, Vol.5, No.2, May, 1990.