

송전손실에 의한 전력시스템의 상태식별법

#○ \$ \$
이 형 수, 심 건 보, 이 봉 용

\$ 홍익대학교 공과대학 전기·제어공학과
산업안전연구원

System State Identification using Transmission Loss

#○ \$ \$
Lee Hyung-Soo, Shim Keon-Bo, Lee Bong-Yong

\$ Hong-Ik University, Dept. of Electrical & Control
Industrial Safety Research Institute

ABSTRACT

Transmission loss retains a complete set of system state information. If we could exploit its behavior, we could find various useful applications. This study is a such exploitation to find some possibilities of the loss application.

It seems to have very prospective possibilities. It has been tried to establish some network indices to indicate operation margin. And further some prospective applications are suggested.

1. 서 론

일반적으로 전기회로에서 발생하는 선로손실은 항상 최소가 되도록 배분된다. 전력시스템 역시 전기회로이므로 송전손실이 최소가 되도록 배분된다. 또한, 송전손실은 시스템 상태의 모든 정보, 즉 모선전압의 크기, 위상각 및 모선어드미턴스 등에 의하여 주어진다. 그래서

“어떤 임의의 주어진 송전손실에 부응하는 시스템의 상태, 즉 모선전압의 크기와 위상각이 식별되었을 때, 이 상태로부터 결정되는 모선의 전력(유효 및 무효전력)은 어떤 의미를 가질 것인가?”

라는 문제를 생각해 본다. 이 문제에 대한 해답은 직관적으로 다음과 같이 요약된다. 즉,

“송전손실이 마치 각 모선에서 발생하는 것처럼 표현가능하고[1], 이 송전손실은 최소가 되도록 배분될 것이므로, 이 상태에서의 모선전력은 그 회로가 공급할 수 있는 최대전력이다.”

라는 것이다. 따라서 실제의 모선부하가 만일 송전손실로부터 주어지는 모선 공급능력과 일치된다면, 이 상태는 매우 이상적인 경우라 하겠으며, 주어진 회로는 100% 활용되고 있다고 할 수 있다. 그러나 실제의 시스템은 이러한 이상적인 상태와 차이를 가질 것이며, 따라서 이상적인

경우와 비교함으로써 실제 시스템의 상태가 주어진 회로를 어느 만큼 잘 활용하고 있는가를 측정할 수 있게 된다. 즉, 시스템의 상태 및 운전여유의 평가가 가능하다.

본 연구는 이러한 관점에서 이루어진 것이다. 그러나 주어진 임의의 송전손실에 부응하는 시스템 상태를 어떻게 식별할 것인가 하는 점이 문제이다. 왜냐하면, 하나의 송전손실을 만족하는 시스템 상태는 일반적으로 굉장히 많으며, 따라서 정답이란 존재하지 않는 것이 되기 때문이다.

본 연구에서는

- 송전손실에 의한 시스템의 상태식별을 정의하고,
- 시스템의 상태 및 운전여유 지수를 정의하고자 하며
- 본 연구의 응용가능 분야를 제시한 후,
- 사례연구로부터 본 연구의 가능성을 입증하고자 한다.

2. 송전손실에 의한 시스템의 상태식별

2.1 송전손실

전력시스템에서 송전손실은 다음과 같이 표현된다.

$$P_L = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i^2 G_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_i V_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (1)$$

여기서,

V_i : i 모선의 전압크기

δ_{ij} : $i-j$ 모선간의 전압위상각

G_{ij} : $i-j$ 모선간의 모선어드미턴스 유효분

n : 시스템의 모선수

식 (1)에서 시스템의 상태인 전압의 크기와 위상각에 따라 송전손실이 종속적으로 결정되는 것이다.

그런데 이러한 관계는 역으로 이용될 수도 있다. 즉, 주어진 송전손실에 부응하는 시스템 상태 V, δ 를 식별하는 것이다. 식 (1)을 다시 쓰면

$$P_L = P_L(V, \delta) \quad (2)$$

와 같고

$$L = (P_L^0 - P_L)^2 \quad (3)$$

여기서,

P_L^0 : 지정한 송전손실

와 같은 목적함수가 정의될 수 있다. 만일 지정한 송전손실과 같은 값의 $P_L(V, \delta)$ 를 구하였다면, 이 때의 V 와 δ 는 지정한 송전손실에 상응하는 시스템의 상태가 되며, 이것이 송전손실에 의한 시스템 상태식별법이다.

그런데 부하가 연속적으로 성장하는 것에 비하여 전력 시스템의 회로망은 연속적인 확장이 곤란하다. 예를 들어 부하의 성장률이 연간 7%라고 할 때, 5년후에는 1.4배의 크기에 해당된다. 회로망은 적어도 이 정도의 기간 또는 부하 크기에 알맞게 구성되어야 한다. 따라서, 지정 송전손실은 현재 송전손실의 1.5배로 지정된다. 현재의 기준 V^0, δ^0 로부터 1.5배 크기의 $P_L(V, \delta)$ 는 유일하다. 이와 같이 어떤 임의의 크기에 해당되는 P_L^0 가 지정될 수 있다.

2.2 상태식별

식 (3)의 최적조건은

$$\nabla L(V, \delta) = 0 \quad (4)$$

이고, 일반적으로 이 조건이 만족되지 않으므로

$$0 = \nabla L(V, \delta) + H \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

H : 헤세안 행렬

와 같은 충분관계가 성립되며, 따라서

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = -H^{-1} \nabla L \quad (6)$$

에 의하여 전압의 크기와 위상각이 수정된다. 그래서 모선 전력

$$P_i = P_i(V, \delta)$$

(7)

$$Q_i = Q_i(V, \delta)$$

여기서,

P_i : i 모선의 유효전력

Q_i : i 모선의 무효전력

이 결정된다. 이 모선전력은 공급능력이며, 실제의 부하(발전기 포함)가 아니라는 점에 유의할 필요가 있다. 그리고 P_L^0 가 현재의 기준상태보다 임의의 배가 큰 값이므로, 식 (7)에서 유효전력이나 무효전력원인 경우에 부동호 제약 조건을 위반할 수 있다. 위반시에는 등호제약조건으로서 식 (3)에 추가되어야 한다.

3. 시스템의 상태 및 운전여유 지수

송전손실의 관점에서 이상적인 전력시스템의 상태는 무엇인가를 먼저 생각한다. 만일 부하를 마음대로 배분할 수 있다고 가정한다면, 송전손실이 최소가 되는 부하상태를 찾을 수 있을 것이다. 즉 다음의 함수를 생각한다.

$$L(P_{Di}, Q_{Di}, \lambda_P, \lambda_Q) = P_L + \lambda_P(P_D - \sum P_{Di}) + \lambda_Q(Q_D - \sum Q_{Di}) \quad (8)$$

여기서,

P_{Di}, Q_{Di} : i 모선의 유효 및 무효 부하

P_D, Q_D : 시스템의 총 유효 및 무효 부하

λ_P, λ_Q : 라그랑지 미정계수

이 함수를 P_{Di}, Q_{Di} 에 대하여 최소화하면

$$\frac{\partial L}{\partial P_{Di}} = \frac{\partial P_L}{\partial P_{Di}} - \lambda_P = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{Di}} = \frac{\partial P_L}{\partial Q_{Di}} - \lambda_Q = 0$$

을 얻는다. 즉, 모든 모선의 충분송전손실이 같아지는 부하의 상태가 송전손실이 최소인 이상적인 상태가 된다. 그런데

$$\Delta P_{Di} = \alpha_P \frac{\partial L}{\partial P_{Di}}, \quad \Delta Q_{Di} = \alpha_Q \frac{\partial L}{\partial Q_{Di}} \quad (10)$$

이고, 또한

$$\sum P_{Di} = 0, \quad \sum Q_{Di} = 0 \quad (11)$$

이므로, 적절한 크기의 ΔP_{Di} 와 ΔQ_{Di} 가 결정될 수 있다. 그러면 V_i 와 δ_i 의 수정이 쉽게 이루어지게 되어, 결국 이상적인 경우와 현재의 경우를 비교함으로써 회로망의 상태지수가 결정될 수 있다.

$$SI_i = \frac{X_i^0 - X_i}{X_i^0} \times 100 [\%] \quad (12)$$

여기서,

- SI_i : i 모선의 상태지수
- X_i^0 : 현재 상태의 P_{Di}^0 또는 Q_{Di}^0
- X_i : 이상적인 상태의 P_{Di} 또는 Q_{Di}

한편, 상태지수와는 달리 부하의 성장관점에서 시스템의 여유도를 판별할 수 있다.

시스템이 현재의 부하상태보다 임의의 배가 큰 공급 능력을 갖는 상태를 기준으로 하여, 운전여유지수를 다음과 같이 정의한다.

$$AI_i = k \times \frac{\left| 1 - \frac{P_i}{P_i^0} \right|}{\alpha} \times 100 [\%] \quad (13)$$

여기서,

- AI_i : i 모선의 운전여유지수
- P_i^0 : 현재 상태의 모선전력
- P_i : P_L^s 지정에 대한 모선전력
- k : 배수
- α : 계수

식 (13)의 의미는 자명하다. 즉, 각 모선에 대하여 현재보다 임의의 배수인 지정 송전손실에 따라 결정되는 각 모선의 공급능력과 현재의 부하상태를 대비시킴으로써, 그 모선에 대한 운전여유도가 평가되는 것이다.

전 시스템의 운전여유지수는 다음과 같다.

$$AI_T = \sum \omega_i AI_i \quad (14)$$

여기서,

- ω_i : 가중계수
- AI_T : 전시스템의 운전여유지수

4. 응용 가능 분야

본 연구에서 제시된 송전손실의 응용은 시스템의 상태지수 및 운전여유지수의 평가에만 국한되지 않는다. 식 (3)을

$$L = K (P_L^s - P_L)^2 + \sum \lambda_{Pi} g_{Pi} + \sum \lambda_{Qi} g_{Qi} \quad (15)$$

여기서,

- K : 스케일 상수
- g_{Pi} : 유효전력 등호제약조건
- g_{Qi} : 무효전력 등호제약조건
- $\lambda_{Pi}, \lambda_{Qi}$: 라그란지 미정계수

와 같이 쓰면, 이 식은 부동호제약의 상하한 위반인 경우에 대해서도 동일한 형태가 된다.

1) λ_{Pi} 및 λ_{Qi} 에 대한 최적조건은

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

J : 자코비안 행렬

라는 일반 전력조류계산식이 된다.

2) 식 (15)는 또한, 다중 슬랙모선 전력조류계산으로 응용된다. 일반적인 전력조류계산에서 슬랙모선(Slack Bus)이란 기준모선을 의미하며, 전력조류계산의 최종 과정에서 유효전력과 무효전력의 등호제약 조건이 일치되도록 하는 모선이다. 즉, 슬랙모선은 언제나 등호제약조건을 만족하는 것이다. 그런데 전력조류계산을 수행하는 경우에, 슬랙모선의 선정에 곤란을 당하는 경우가 많이 발생하게 된다. 이러한 문제는 전력조류계산의 결과가 예상에서 벗어나는 경우에 더욱 곤란을 느끼게 된다.

본 연구에서 제시된 목적함수인 식 (3)은 이러한 경우에 다중 슬랙모선을 도입함으로써 쉽게 해결할 수 있도록 한다. 즉, 슬랙모선은 항상 등호제약 조건이 만족되므로 식 (3)에 반영될 필요가 없다. 다만, 슬랙모선이라고 하더라도 부동호제약조건이 위반일 경우에는 등호제약 조건으로서 고려되어야 한다. 이렇게 하므로써 슬랙모선이라고 하더라도 실제적인 출력상태를 고려할 수 있는 것이다.

3) 식 (15)를

$$L = K_1 (P_L^s - P_L)^2 + K_2 (Q_L^s - Q_L)^2 + \lambda_P g_{EP} + \lambda_Q g_{EQ} \quad (15)$$

여기서,

- K_1, K_2 : 스케일 상수
- g_{EP} : 등가시스템의 유효전력 등호제약조건
- g_{EQ} : 등가시스템의 무효전력 등호제약조건
- λ_P, λ_Q : 라그란지 미정계수

와 같이 바꾸면, 이식은 등가시스템축약이라는 매우 유용한 분야에의 응용이 가능하다. 경우에 따라 다수의 모선을 단 하나의 모선으로 등가 대치가 필요한 경우가 발생되며, 바로 이 때, 식 (15)가 활용될 수 있다.

4) 식 (15)는 또한, 전압안정성의 해석에서 여러 운전 점의 특성을 원하는 경우에, P_L 를 점차적으로 증가시켜 감으로써 모선전력의 증가를 송전손실증가의 방향으로 유도해 나갈 수 있게 한다.

5. 사례연구

본 연구에서 제시된 송전손실에 의한 전력시스템의 상태식별법 알고리즘을 5 모선 및 25 모선시스템의 표준 시스템에 대하여 시스템의 적정성을 판별하는 운전여유지수에 대한 사례연구를 수행하였다.

<표 1>과 <표 2>는 각시스템의 운전여유지수를 정리한 것이다. <표 1>에서 보는 바와 같이 운전여유지수가 100 [%] 이상인 모선은 Network의 공급능력이 여유가 있는 모선이며, 100 [%] 이하인 모선은 network의 공급능력이 여유가 없는 모선이라고 할 수 있어서, 이에 대한 대책이 필요한 모선이다. <표 2>에는 25모선시스템의 결과를 보인 것으로 15, 16, 17번 모선은 발전기모선으로서 송전손실의 증가(부하의 증가)에 따라 발전 공급여력이 감소하여 회로망의 공급능력이 부족하다는 것을 나타내고 있다. 본래 이 25 모선시스템은 불안정한 시스템으로서 안정운전을 위한 대책 수립이 필요한 시스템이다.

<표 1> 5모선시스템의 운전 여유지수

번호	모 선 전 력 [p.u]				운 전 여 유 지 수 [%]	
	기 준 경 우		증 가의 경 우			
	P_i	Q_i	P_i	Q_i	유 효 전 력	무 효 전 력
1	-0.597	-0.010	-0.738	-0.467	47.32	743.52
2	0.202	-0.100	0.327	0.353	123.62	906.02
3	-0.157	0.167	0.150	0.458	390.73	349.75
4	-0.395	-0.050	-0.648	-0.408	128.02	1430.90
5	0.977	-0.146	0.954	-0.116	---	---

<표 2> 25모선시스템의 운전 여유지수

번호	모 선 전 력 [p.u]				운 전 여 유 지 수 [%]	
	기 준 경 우		증 가의 경 우			
	P_i	Q_i	P_i	Q_i	유 효 전 력	무 효 전 력
1	-0.250	-0.080	-0.221	-0.137	23.63	141.83
2	-0.151	-0.050	-0.425	-0.263	363.34	852.49
3	-0.300	-0.100	-0.840	-0.520	359.50	840.38
4	-0.150	-0.050	-0.289	0.179	585.27	916.23
5	-0.150	-0.050	-0.026	0.016	234.42	263.88
6	-0.050	0.000	-0.309	-0.191	1035.70	200.00
7	-0.100	0.000	-0.332	-0.206	463.58	200.00
8	-0.250	-0.080	-0.334	-0.207	67.28	317.31
9	-0.200	-0.070	-0.743	-0.460	542.86	1114.80
10	-0.150	-0.050	-0.111	-0.069	52.60	74.21
11	-0.150	-0.050	-0.257	-0.159	142.97	437.23
12	-0.250	-0.087	-0.791	-0.490	433.07	1025.40
13	-0.300	-0.100	-0.725	-0.449	683.10	1097.30
14	1.000	-0.170	1.205	0.183	41.00	415.44
15	1.750	-0.372	1.750	-0.111	0.00	140.37
16	0.200	0.080	0.201	0.174	0.93	221.21
17	0.900	-0.078	0.901	0.132	0.22	541.35
18	-0.150	-0.050	-0.073	0.045	296.81	379.95
19	-0.150	-0.050	-0.037	-0.023	150.18	107.12
20	-0.200	-0.070	-0.017	-0.011	217.21	230.09
21	-0.200	-0.070	-0.221	-0.137	21.36	191.17
22	-0.150	-0.050	-0.129	0.080	372.45	520.18
23	-0.250	0.000	-0.424	-0.263	139.31	200.00
24	-0.600	-0.200	-0.341	-0.211	86.44	113.48
25	0.461	0.463	0.309	1.153	---	---

6. 결 론

전력시스템에서 송전손실이 시스템의 상태를 나타내는 모든 정보를 가지고 있다는 점에 착안하여, 이러한 정보를 이용한 시스템 상태식별법을 제안한 본 연구의 주된 내용은 다음과 같이 요약된다.

- 1) 주어진 송전손실에 상응하는 시스템 상태식별법을 제안하였다.
- 2) 시스템의 적정성을 판별하는 상태지수와 운전여유지수를 제안하였다.
- 3) 제시된 방법은 다중 슬랙모선 전력조류계산에 이용할 수 있음을 제안하였다.

4) 제시된 방법의 응용가능 분야로서

- 시스템의 적정성 평가
- 다중 슬랙모션 전력조류계산
- 시스템의 동가 축약
- 전압안정성해석

에 대하여 언급되었으며, 일부는 본 연구에서 사례연구를 통하여 효용성을 입증하였다.

7. 참고 문헌

- [1] B.Y.Lee, K.B.Shim & K.B.Oh, "An Effective Economic P-Q Control with Bus Distributed Transmission Line Loss Information", Proceedings of International Conference on Power System Technology 1991, pp. 327 ~332, Beijing China, Sep. 13-17, 1991.
- [2] 백수열, 김정훈, 심건보, 이봉용, "부하 중심점 개념의 전력시스템 정태 동가축약", 대한전기학회 '92년도 하계 학술회의 발표예정
- [3] 전동훈, 김정훈, 심건보, 이봉용, "송전손실 상태 식별법에 의한 정태 전압안정성 해석", 대한전기학회 '92년도 하계학술회의 발표예정