

온라인 전력계통 안정도 진단을 위한 선로 선정 방안

조윤성, 장길수, 권세혁
고려대학교 전기전자전파공학부

Identification of Correlative Transmission Lines for On-Line Stability Diagnosis

YoonSung Cho, Gilsoo Jang, Sae-Hyuk Kwon
School of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - Power system stability is correlated with system structure, disturbances and operating conditions, and power flows in transmission lines are closely related with those conditions. This paper discusses a methodology to identify crucial transmission lines for stability diagnosis with respect to transient stability and small-signal stability. On-line monitoring of the selected lines enables to predict system stability in real-time. Also, a procedure to make a priority list of monitored transmission lines using contingency analysis. The procedure is applied to the PSS/E test system, and it shows capabilities of the proposed method

본 논문에서는 전력계통 안정도 진단 및 예측이 가능한 선로를 선정하는 방법을 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 제안하였다. 본 논문에서 제안되는 방안의 전체 순서도는 그림 1과 같다.

1. 서 론

전력계통의 규모가 증대되고 구성이 복잡 다양화됨에 따라 계통의 온라인 안정도 해석이 절실히 요구되고 있다. 또한 최근의 국제 동향은 특정 사고에 대한 동기 발전기의 전기-기계적(electro-mechanical) 특성을 파악하는 안정도 해석뿐만 아니라, 발생 가능한 사고시의 계통상태를 정확히 예측하여 불안정 상태인 경우 신속한 안정화 제어를 위한 온라인 예측 기법으로 확장되고 있다. 계통의 안정도는 계통 구조, 외란 그리고 운전 조건과 상호 관련성이 있고, 특히 선로조류는 이러한 요인들과 더욱 밀접한 관계에 있다. 발전기 탈조와 관련 있는 선로를 선정하여 임계(Critical) 선로에 EMS(Energy Measurement System)를 설치하여 실시간으로 감시·제어에 활용한다면 전체 계통의 안정도 향상에 기여할 수 있다. 본 논문에서는 전력계통 안정도의 진단이 가능한 선로 선정 방법론을 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 다루고 있다. 과도 안정도 관점에서 각 상정 사고의 임계 고장 시간(Critical Clearing Time :CCT)전의 조류를 TSP(Transient Stability Prediction)지수에 의해 탈조하는 발전기와 관련 있는 선로가 선택되고 이에 따라 각 선로에 대한 우선 순위를 정한다. 미소신호 안정도 관점에서 미소 외란에 대한 계통 상태 행렬을 구성하여 고유치 계산을 통해 임계 고유치를 선정하고, 선정된 고유치에 대한 선로별 감도(sensitivity)를 계산하여 선로별 우선 순위를 정한다.[1][2][3] 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 계산된 두 개의 우선 순위를 바탕으로 본 논문에서는 전력계통 안정도에 가장 큰 영향을 미치는 예측 가능 선로를 선정하는 방법을 제안하였다. 제시한 방법은 PSS/E에서 제공된 6기 20모선 시험계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.[5][6][7]

2. 본 론

2.1 예측 가능 선로 선정

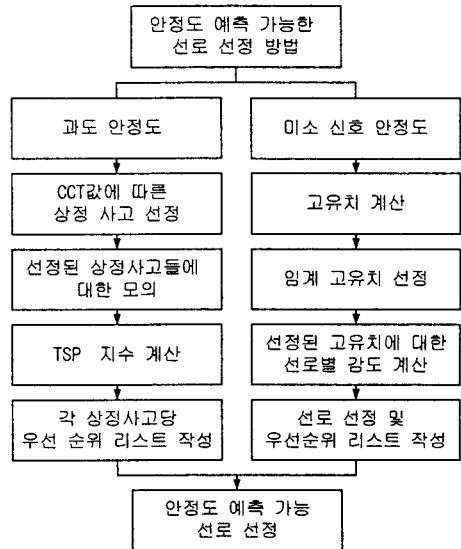


그림 1. 선로 선정 방법

각 과정에 대한 설명은 다음절에서 자세히 다루진다.

2.2 과도 안정도 해석

임계 고장 시간은 과도 안정도 해석에서 매우 일반적인 지표이다. 이것은 보통 하나 혹은 그 이상의 발전기들이 동기를 잃지 않으면서 사고가 최대로 지속될 수 있는 시간으로 정의된다. 임계 고장 시간 바로 전의 선로 조류중에는 발전기의 탈조 여부를 판단 할수 있는 정보를 가진다는 전제를 가지고, 본 논문에서는 탈조 여부를 예측할 수 있는 방법으로 정규화된 유효 전력값들을 시간으로 나눈 값을 합한 TSP지수를 제안한다. TSP지수는 상대적인 비교를 통해서 사고에 가장 민감한 변화를 보이는 선로를 선정할 수 있다.

$$TSP = \sum_{t_0}^{t_1} \frac{|P_2 - P_1|/P_1}{\Delta t} \quad (1)$$

t_0 = 사고 발생 시간

t_1 = 사고 제거후 시간

P_1 = 선로 조류

P_2 = Δt 후의 선로 조류

TSP값은 사고에 의존하는 해당 상정사고에 대한 비교만 의미가 있으며, 본 논문에 사용하는 상정사고는 다음과 같다.

- ① 모든 모선에 사고를 주어 임계고장 시간을 계산한다.
- ② 임계고장 시간은 충분한 시간을 모의한 다음 gap criterion을 이용하여 임계고장 시간을 계산하였다.
- ③ 계산된 임계고장 시간 중 계통에 가장 심각한 영향을 미치는 임계고장 시간을 선정한다.
- ④ TSP지수를 계산한다.

위 과정은 PSS/E의 IPLAN을 이용하여 일괄적으로 모든 과정을 수행한다. 따라서, 각 상정 사고별로 선로 리스트가 작성되게 된다.

2.3 미소 신호 안정도 해석

미소 신호 안정도 관점에서는 주어진 계통의 운전조건과 구조에서 각 선로에 흐르는 유효전력에 대한 고유치 감도 해석에 기초한다.

2.3.1 고유치 감도 해석

선형 시스템이론에 의한 계통의 동적 특성은 식(2)와 같이 표현된다.

$$\dot{x} = Ax \quad (2)$$

이 미분 방정식의 해는 식(3)으로 주어진다.

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \sum_{j=1}^N u_{ij} y_{j0} e^{\lambda_j t} \\ &= \sum_{j=1}^N u_{ij} \sum_{k=1}^N y_{jk} X_{k0} e^{\lambda_j t} \\ &= \sum_{j=1}^N \sigma_{ij} e^{\lambda_j t} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 시스템 파라미터 P_{ab} 의 변동에 대한 고유치 감도는 식(4)와 같이 된다.

$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial P_{ab}} = \frac{v_i^T \frac{\partial A}{\partial P_{ab}} u_i}{v_i^T u_i} \quad (4)$$

여기서,

$$\frac{\partial A}{\partial P_{ab}} = \frac{\partial A}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial P_{Gj}} \frac{\partial P_{Gj}}{\partial P_{ab}} \quad (5)$$

v_i = 좌 고유벡터

u_i = 우 고유벡터

이다.

2.3.2 발전기 모델링

본 논문에서 전력계통을 구성하는 발전기는 제어기가 없는 고전 모델(classical model)로 표현되었다. 동요 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} M_i \dot{\omega}_i &= P_{mi} - \sum_{j=1}^n [C_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ C_{ij} &= E_i E_j B_{ij} \quad \dots \quad (6) \\ D_{ij} &= E_i E_j G_{ij} \end{aligned}$$

위 식(6)으로부터 시스템 방정식은 다음과 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & U \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

U = the identity matrix

x_1 = the n-1 vector of the angle changes δ_A

x_2 = the n-1 vector of the speed changes $d\delta_A/dt$

위 식(7)에서 A는 식(6)을 $\dot{\omega}$ 에 대해 (n-1)개의 방정식에 대한 계수를 나타낸다. 고유치 감도 계산을 위한 식(5)의 $\frac{\partial A}{\partial X_i}$ 는 식(7)의 계수 A를 δ 로 미분한다.

2.3.3 유효 전력과 회전자 위상각과의 관계

i번째 발전기에서 전기적 출력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^n V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (8)$$

위 식(8)으로부터 고유치 감도해석에 필요한 $\frac{\partial X_i}{\partial P_{Gj}}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{e1} \\ \vdots \\ \Delta P_{e(n-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{1j} & \dots & -F_{1(n-1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -F_{(n-1)1} & \dots & \sum_{j=1, j \neq i}^n F_{(n-1)j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \vdots \\ \Delta X_{(n-1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_{ij} = -C_{ij} \sin(\delta_{ie} - \delta_{je}) + D_{ij} \cos(\delta_{ie} - \delta_{je})$$

식(9)에서 역행렬 계수가 $\frac{\partial X_i}{\partial P_{Gj}}$ 이다.

2.3.4 발전기 유효전력과 선로 유효전력과의 관계

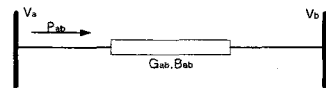


그림 2. Vab사이의 유효전력

모선 a,b사이에서 흐르는 유효전력은 G_{ab}, B_{ab} 에 관한 식으로 나타낼 수 있다. P_{ab} 를 회전자 위상각에 관한 식으로 정리할 수 있고, 식(9)를 대입함으로써 $\frac{\partial P_{Gj}}{\partial P_{ab}}$ 를 구한다.

2.3.5 임계 선로 선정 알고리즘

- ① 불안정한 모드 선정: 계통의 선형화를 통해 구해진 계통 상태 형렬로부터 고유치를 구한 후 그 고유값 중 제동이 작은 모드들을 우선 선택한 후 주파수가 낮은 모드(1~8Hz)를 불안정한 모드로 선정한다.
- ② 선정된 고유치에 대한 선로별 고유치 감도를 구한다.
- ③ 변화된 계통의 운전조건과 구조에서 각 선로에 흐르는 유효전력에 대하여 ①, ②를 반복 실행한다.
- ④ 안정도 진단이 가능한 선로 선정

3. 사례 연구

3.1 과도 안정도

본 논문은 제안한 방법을 PSS/E에서 제공된 6기 20모선에 적용 검증하였고 시간 모의 프로그램으로는 PSS/E를 사용하였다. 시간스텝은 0.0083초 시간간격을 사용하였으며 상정사고는 모선 사고를 고려하였다. 모선 152의 CCT=0.7913초, 모선 154의 CCT=0.3494초, 모선 3005의 CCT=0.6166이다.

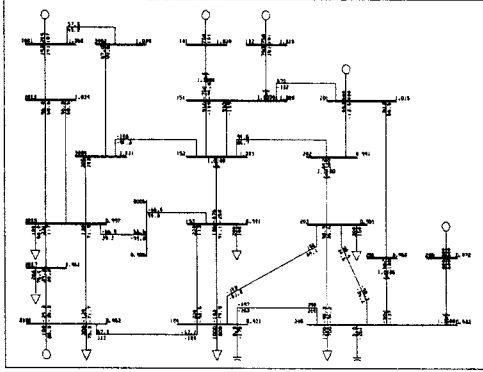


그림 3. 6기 20 모선 시험 계통

표1. 과도 안정도 관점에서의 우선 순위

From Bus	To Bus	상정 사고 Bus 152	상정 사고 Bus 154	상정 사고 Bus 3005
151	101	-1999.36	-1967.44	-975.78
151	102	-1999.36	-1967.44	-975.78
151	152	2058.43	1447.63	641.19
151	201	-3709.67	2261.963	5678.09
152	153	4402.47	953.87	577.75
152	202	-1811.15	8810.17	789.24
152	3004	239.10	5463.83	9369.22
153	154	2252.65	-3681.99	586.35
153	3006	-3155.40	-381.99	5958.46
154	203	-977.76	58.82	-475.08
154	205	-1951.34	6093.63	-713.34
154	3008	-1474.13	-2548.62	4627.24
201	202	981.72	884.48	605.33
201	204	1980.04	2332.43	415.88
202	203	-1986.94	6312.19	343.93
203	205	2524.18	-104.23	716.72
204	205	251.24	383.16	424.75
205	206	-362.94	-1760.56	-651.88
3001	3002	4337.73	1053.18	-3341.03
3001	3003	3237.94	601.73	899.35
3002	3004	4337.73	1053.18	-3341.03
3003	3005	3211.73	595.64	900.91
3004	3005	-280.06	1441.57	531.42
3005	3006	2463.63	-247.29	2060.00
3005	3007	715.84	900.69	-1124.95
3005	3008	1253.19	-8327.87	470.55
3007	3008	1083.20	-9835.52	95.97

표 1에서는 본 논문에서 제안된 TSP지수를 계산하여 발전기 탈조와 관련이 있는 선로를 선정하였다. 표 1에서 보면 모선 151~201, 154~3008, 3002~3004등은 다른 상정 사고시에도 발전기 탈조 여부와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 4,5,6,7를 보면 모선 154~3008의 조류가 모선 204~205의 조류보다 발전기의 탈조 여부와 더욱 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

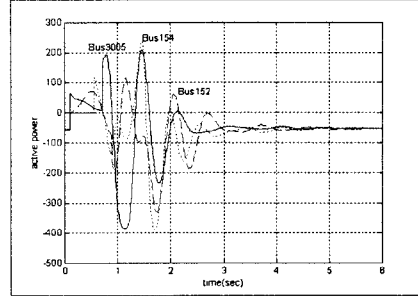


그림 4. 모선154~3008의 유효전력(CCT전)

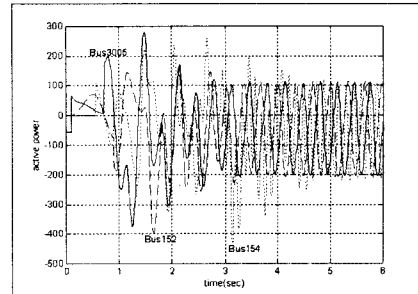


그림 5. 모선154~3008의 유효전력(CCT)

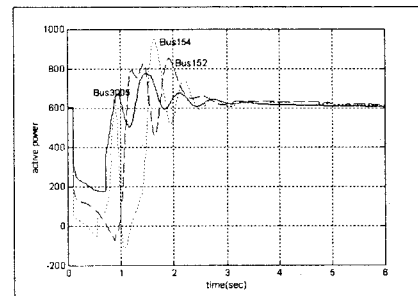


그림 6. 모선204~205의 유효전력(CCT전)

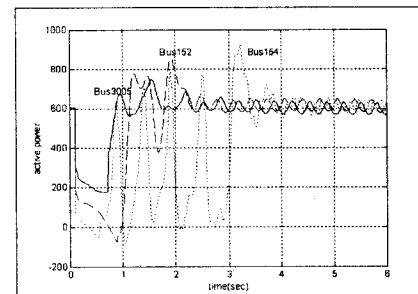


그림 7. 모선204~205의 유효전력(CCT)

3.2 미소 신호 안정도

본 논문에서 전력계통을 구성하는 발전기는 제어기가 없는 고전 모델로 표현되어서, 고유치에서 제동특성은 표현되지 못한다. 표 2에서 계통의 선형화를 통해 구해진 계통 상태 행렬로부터 고유치를 구한 값이다. 고유값 중 저주파수모드(1~8Hz)를 불안정 모드로 선정하므로 주파수가 5.5366(Hz)인 $\lambda_{3,4}$ 를 불안정 모드로 선택한다.

표 2. 6기 20모선 계통의 고유값

고유치	ω [rad/s]	f [Hz]	T[s]	
λ_{12}	$\pm j1.645E+02$	$\pm 1.645E+02$	26.1904	0.0382
λ_{34}	$\pm j0.348E+02$	$\pm 0.348E+02$	5.5356	0.1806
λ_{56}	$\pm j1.274E+02$	$\pm 1.274E+02$	20.2714	0.0493
λ_{78}	$\pm j1.089E+02$	$\pm 1.089E+02$	17.3343	0.0577
$\lambda_{9,10}$	$\pm j1.129E+02$	$\pm 1.129E+02$	17.9615	0.0557

표 3. 6기 20모선 계통의 고유치 감도

	모선154~3008	모선204~205	모선201~202
$\partial\lambda_{3,4}/\partial P_{ab}$	$\pm j2.103E-06$	$\pm j2.498E-07$	$\pm j5.676E-07$

표 3은 선정된 불안정 모드($\lambda_{3,4}$)에 대한 고유치 감도 즉, $\partial\lambda/\partial P_{ab}$ 을 구한 값이다. 표 3을 통해서 각 선로에 흐르는 유효전력이 고유치에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 미소 신호 안정도 개념에서의 선로선택이 가능하다. 본 논문에서는 발전기 모델링을 고전 모델로 표현했는데, 앞으로는 2축모델링(two-axis model)하고 제어기를 추가하여 모드의 제동특성에 영향을 미치는 선로의 선정 방안을 연구할 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 전력계통 안정도의 진단이 가능한 선로 선정 방안을 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 다루고 있다. 과도 안정도 관점에서는 제안된 TSP지수를 통해서 안정도 진단 선로를 선정하였고, 미소 신호 안정도 관점에서는 선로에 흐르는 유효전력을 고유치 파라미터로 사용하여 고유치 해석을 통한 임계선로를 선정하는 방안을 제시 하였다. 두 관점에서 선정된 우선 순위를 바탕으로 본 논문에서는 전력계통 안정도에 가장 큰 영향을 미치는 예측 가능 선로를 선정하였다.

제안된 선로 양단에 GPS(Global Positioning System)을 설치하고 예측기법을 사용하면 전체 계통의 안정도 향상에 기여 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1994
- [2] A.A Fouad and Vijay Vittal, " Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Function Method", Englewood Cliffs, New Jersey:Prentice-Hall, 1992
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [4] P.W. Sauer and M.A. Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998
- [5] Jang, G. "Nonlinear control design for stressed power systems using normal forms of vector fields", Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 1997

- [6] PSS/E Application Manual, Power Technologies, Inc., 1995
- [7] PSS/E Operation Manual, Power Technologies, Inc., 1995
- [8] PSS/E Iplan Program Manual, Power Technologies, Inc., 1995