

전력계통의 안정도 진단이 가능한 선로 선정에 관한 연구

論 文

52A-5-5

Identification of Correlative Transmission Lines for Stability Diagnosis of Power System

趙尹晟* · 張吉洙** · 權世嫻***

(Yoon-Sung Cho · Gil-Soo Jang · Sae-Hyuk Kwon)

Abstract - Power system stability is correlated with system structure, disturbances and operating conditions, and power flows on transmission lines are closely related with those conditions. This paper proposes a methodology to identify correlative power flows for power system transient and small-signal stability prediction. In transient stability sense, the Critical Clearing Time is used to select some dominant contingencies, and Transient Stability Prediction index is proposed for the quantitative comparison. For small-signal stability, this paper discusses a methodology to identify crucial transmission lines for stability prediction by introducing a sensitivity factor based on eigenvalue sensitivity technique. 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 is proposed. The procedure is applied to a test system and the KEPCO systems in the year of 2003 and it shows capabilities of the proposed method

Key Words : Transient stability, Small-signal stability, TSP, CCT, Eigenvalue, Sensitivity

1. 서 론

전기에너지가 현대의 생활에 미치는 영향을 고려해 볼 때 안정적인 전기에너지의 공급은 절대적으로 요구되며, 이에 따라 전력시스템의 온라인 안정도 감시 및 해석의 필요성이 대두되고 있다. 전력계통의 규모가 증대되고 구성이 복잡 다양화됨에 따라 전력시스템의 온라인 해석은 많은 계산 부담을 가지고 있다. 그리고, 전력계통이 고밀도, 대형화되는 만큼 다양한 외란에 노출되는 등 계통사고에 대한 위험성 또한 높아지고 있다. 더욱이 국내 전력계통은 전원의 지역별 편재에 따른 장거리 전력수송 증가와 고장용량증가로 인한 선로 및 모선 분리 운전개소의 증가로 계통신뢰도면에서 많은 위험부담을 안고 있다. 이러한 계통여건의 변화는 새로운 불안정현상을 초래할 가능성을 높인다는 점에서 통합된 계통감시기능의 필요성이 더욱 부각되고 있다. 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. 특히 일본의 온라인 안정화 제어 시스템은 대전원 계통의 출력단지에서의 전기적 출력변화, 모선전압, 위상각 변화를 측정하여 실시간으로 동기탈조 여부

를 예측하고, 발전기의 동기탈조가 예측될시 일부 발전기를 강제 탈락시켜 나머지 발전기의 탈조를 방지하여 전체 계통의 안정도 유지를 목표로 한다.

본 논문에서는 전체 계통의 안정도에 영향을 미치는 임계 선로 선정과 온라인상에서 예측 기법을 적용하기 위한 임계 파라미터로 선로 조류를 사용하였다. 선로 조류는 다음과 같은 특징이 있다. 첫째, 계통의 안정도는 계통 구조, 외란 그리고 운전 조건과 상호 관련성이 있고, 특히 선로조류는 이러한 요인들과 더욱 밀접한 관계가 있다. 둘째, 과도 안정도에 영향을 미치는 여러 가지 요인 중 하나이다. 셋째, 온라인상에서 데이터 취득이 용이하다.

이를 바탕으로 발전기 탈조와 관련 있는 선로를 선정하고, 해당 임계 선로에 GPS(Global Positioning System) 기능이 있는 데이터 취득 장치를 설치하여 실시간으로 감시·제어에 활용한다면 전체 계통의 안정도 향상에 기여 할 수 있다. 또한 전체 선로에 감시 장비를 설치하는 것보다 임계 선로에만 설치하여 감시하므로 경제적 효과도 얻을 수 있다.

본 논문에서는 전력 계통 안정도의 진단이 가능한 선로 선정 방법론을 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 다루고 있다.[1] 각각의 우선순위를 바탕으로 전력계통 안정도에 가장 큰 영향을 미치는 예측 가능 선로를 선정하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안되는 방안의 전체 순서도는 그림 1과 같다.

과도 안정도 관점에서는 우선, 계통의 모든 사고를 상정하여 임계 고장 시간(Critical Clearing Time)을 계산하고 계통에 심각한 영향을 미치는 상정 사고를 선정한다.[2][3] 임계 고장 시간은 SIME(Single Machine Equivalent)법과 위상차차(Gap Criterion)법을 사용하여 계산 하였다. SIME법

* 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

*** 正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 9月 13日

最終完了 : 2003年 3月 17日

은 시간영역 모의를 초기에 종료하고 계통을 등가 1기 무한대 계통으로 변환 한 후 등면적법을 이용하여 CCT를 계산한다.[4] 다음, 임계 고장 시간전의 조류를 계산된 TSP지수에 의해 탈조하는 발전기와 관련 있는 선로가 선택되고 이에 따라 각 선로에 대한 우선순위를 정한다. 얻어진 우선순위를 바탕으로 안정도 예측 가능 선로를 선정한다. 미소 신호 안정도 관점에서는, 미소 외란에 대한 계통 상태 행렬을 구성하여 고유치 계산을 통해 임계 고유치를 선정하고, 선정된 고유치에 대한 선로별 감도를 계산하여 선로별 우선순위를 정한다.[5][6][7][8][9] 제시한 방법은 PSS/E에서 제공된 6기 20모선 시험계통과 2-지역 계통(a simple two-area system) 그리고 한전 2003년 계획 계통에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.[10]

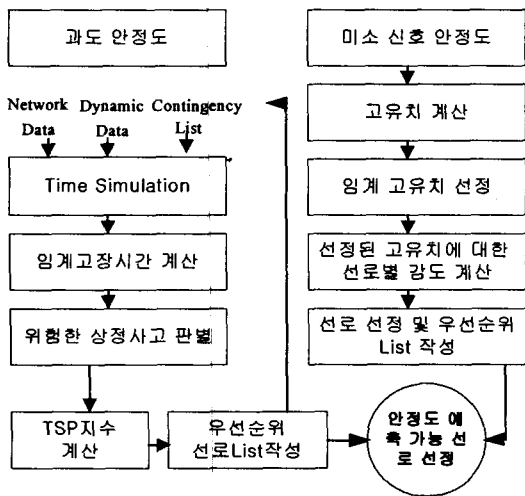


그림 1 임계 선로 선정 방법
Fig. 1 Identification procedure

2. 본 론

2.1 과도 안정도 해석

본 논문에서 제안된 과도 안정도 관점에서의 안정도 진단 및 예측이 가능한 선로를 선정하는 순서도의 각 과정에 대한 설명은 다음과 같다. 우선 모든 모선에 사고를 주어 충분한 시간을 모의한 다음 Gap Criterion을 이용하여 임계고장 시간을 계산하여 계통에 가장 심각한 영향을 미치는 임계고장 시간을 선정한다. 그림 2는 발전기 회전자 위상각의 탈조 전·후 즉, CCT가 구해지는 과정을 나타내고 있다. 시간 모의에 필요한 계산 단위시간이 동일하므로 탈조 전의 사고 지고속시간은 탈조시의 한 스텝전이다. 또한, 345kV 이상 2회선 선로의 3상 지락사고를 SIME법[2]을 이용하여 임계고장 시간을 계산한다. 시간 모의 초기단계에서 발전기들을 그룹핑하여 1기 무한 모선으로 구성하고 전력-상차각의 궤적을 그려서 안정도 판별을 네 가지로 세분화하여 매우 심각한 사고만 골라 위험 상정 사고로 선정하였다.(그림 3의 (b) Dangerous Contingency) 다음으로 선정된 상정사고에 대해 본 논문에서 제안된 TSP지수에 의하여 안정도 예측 가능한 선로를 선정한다.

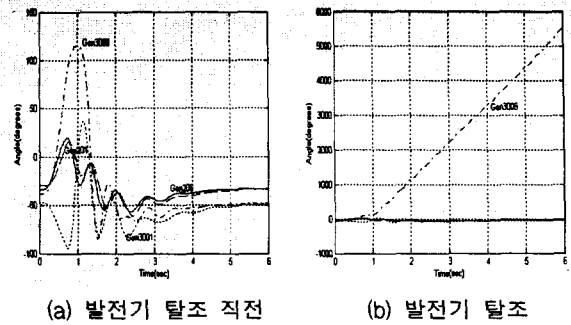
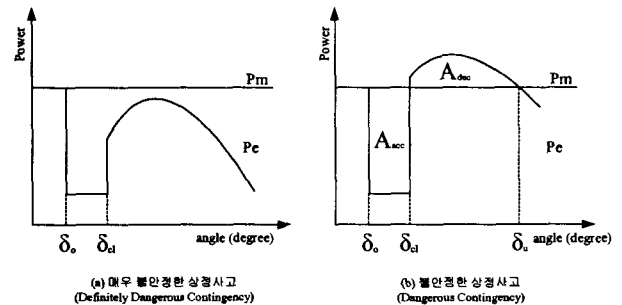


그림 2 사고시 발전기의 상대적 위상각의 시간에 따른 변화
Fig. 2 Generator relative angle at fault



δ_w : 불안정 시점에서의 위상각 δ_r : 안정한 경우 회귀위상각
 δ_o : 사고 발생 시 위상각 δ_{cl} : 사고 제거 시 위상각
 A_{acc} : 발전기 가속 면적 A_{dec} : 발전기 감속 면적

그림 3 불안정한 상정사고의 전력상차각곡선
Fig. 3. Classifying the contingencies by using power-angle shape

2.1.1 TSP 지수

본 논문에서는 과도 안정도에 영향을 미치는 요인중 매우 일반적인 지표인 임계 고장 시간을 안정도 파라미터로 사용하였다. 이것은 보통 하나 혹은 그 이상의 발전기들이 동기를 잃지 않으면서 사고가 최대로 지속될 수 있는 시간으로 정의된다. 임계 고장 시간 바로 전의 선로 조류 중에는 발전기의 탈조 여부를 판단 할 수 있는 정보를 포함하고 있다. 전제 하에 TSP(Transient Stability Prediction)지수를 제안하였다.

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

t_0 : 사고 발생 시간 t_1 : 사고 제거 시간
 P_1 : 선로 조류 P_2 : Δt 후의 선로 조류

TSP지수는 탈조 여부를 예측할 수 있는 방법으로, 정규화된 유효 전력값들을 시간으로 나눈 값이다. 각 선로의 TSP지수의 상대적인 비교를 통해서 사고에 가장 민감한 변화를 보이는 선로를 선정할 수 있다. TSP값은 사고에 의존하는 해당 상정사고 비교시에만 의미가 있다.

2.1.2 제안된 TSP지수의 시험계통에 적용

시험 계통은 PSS/E에서 제공된 6기 20모선 계통으로서 그림 4에 사용된 시험 계통의 주요부분을 나타내었다. 동적 시뮬레이션의 수행을 위해서는 계통을 구성하고 있는 여러 기기들의 적절한 모델링과 그 데이터를 필요로 한다. 시험계통은 6개의 발전기와 6개의 여자기, 4개의 조속기로 구성되어 있으며, 발전기의 경우 원통형으로 5개 돌극형으로 1개 모델링 되어있다.

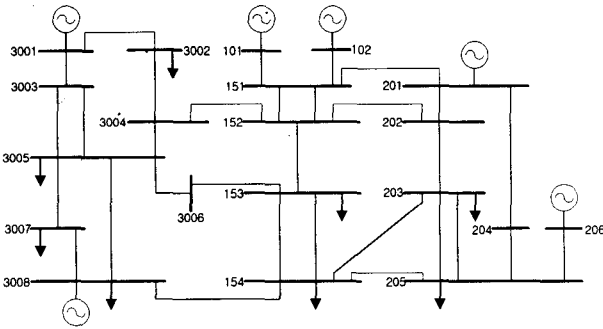


그림 4 시험계통(6기 20모선)
Fig. 4 A 6-generator 20-bus test system

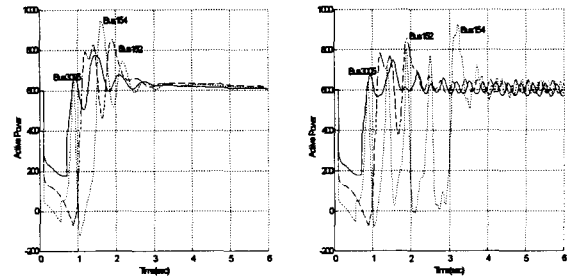
표 1 시험계통의 TSP 지수
Table 1 Priority list w.r.t. transient stability

모선 번호		사고 위치		
From	To	Bus 152	Bus 154	Bus 3005
151	101	4277.32	1967.44	975.78
151	102	4277.32	1967.44	975.78
151	152		1447.63	641.19
151	201	8386.71	6703.05	7253.62
152	153		953.87	577.75
152	202			6037.99
152	3004			
153	154	4926.28		586.35
153	3006	1245.01	5918.89	9582.51
154	203	3604.81		475.08
154	205	1951.34		3184.26
154	3008			
201	202	981.72	2729.67	605.33
201	204	3545.88	5666.06	415.88
202	203	4235.21	6312.19	343.93
203	205	4957.12	6565.18	716.72
204	205	3069.72	6079.01	424.75
205	206	3221.23	6192.94	651.88
3001	3002		5331.17	
3001	3003	6490.08	5750.78	7515.23
3002	3004		5331.17	
3003	3005	6464.92	5750.21	
3004	3005	4773.92	1441.57	
3005	3006		5744.75	
3005	3007	3080.24	2021.52	
3005	3008	5180.26		
3007	3008	4651.57		5621.25

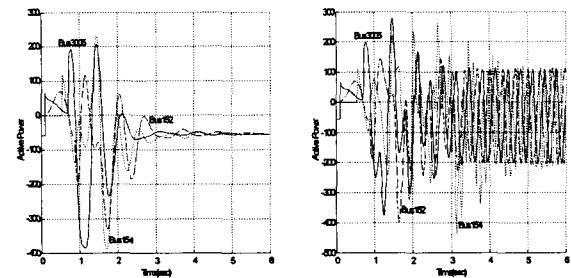
임계고장시간은 전체 모선에 모선 사고를 가정한 시나리오를 가지고 충분한 시간을 모의한 후 Gap Criterion에 의

해 계산한다. 계산된 CCT 중에서 계통에 심각한 영향을 미치는 선정된 임계 CCT는 다음과 같다. 표 1은 시험계통의 TSP지수를 계산한 것이다.

- Case 1: 모선 152사고의 CCT = 0.7913 [sec]
- Case 2: 모선 154사고의 CCT = 0.3494 [sec]
- Case 3: 모선 3005사고의 CCT = 0.6166 [sec]



(a) CCT전의 유효전력 (b) CCT 때의 유효전력
그림 5 둔감한 선로의 유효전력의 시간에 따른 변화
Fig. 5 Active power of impassive transmission lines



(a) CCT전의 유효전력 (b) CCT 때의 유효전력
그림 6 민감한 선로의 유효전력의 시간에 따른 변화
Fig. 6 Active power of sensitive transmission lines

표 1을 바탕으로 탈조와 관련이 있는 선로를 살펴보면, 모선 152~3004, 154~3008, 3001~3002 그리고 모선 3002~3004등은 모선 201~204, 모선 204~205 보다 TSP 지수 값이 상대적으로 크다. 즉, 모선 152~3004, 모선 154~3008, 모선 3001~3002 그리고 모선 3002~3004는 다른 상정 사고 시에도 발전기 탈조 여부와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 5은 탈조 여부와 둔감한 선로(모선 204~205)를 보여주고, 그림 6은 탈조 여부와 민감한 선로(모선 154~3005)의 유효 전력을 보여주고 있다. 따라서, 모선 154~3008의 조류가 모선 204~205의 조류보다 발전기의 탈조 여부와 더욱 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

2.2 미소신호 안정도 해석

미소 신호 안정도 관점에서는 주어진 계통의 운전조건과 구조(topology)에서 각 선로에 흐르는 유효전력에 대한 고유치 감도 해석에 기초한다. 압박된 전력계통(stressed power system)에서 선로에 흐르는 유효전력은 중요한 임계 파라미터이다. 따라서, 본 논문에서는 시스템 파라미터로 를 사용하였다.

2.2.1 고유치 감도 해석

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

$$\dot{x} = Ax \tag{2}$$

이 미분 방정식의 해는 식(3)으로 주어진다.

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

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

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

여기서

$$\frac{\partial A}{\partial P_{ab}} = \frac{\partial A}{\partial X_i} \frac{\partial X_i}{\partial P_{G_i}} \frac{\partial P_{G_i}}{\partial P_{ab}} \tag{5}$$

v_i = 좌 고유벡터

u_i = 우 고유벡터

2.2.2 발전기 모델링

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

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^n [C_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + D_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \tag{6}$$

$$C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$$

$$D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$$

위 식(6)으로부터 시스템 방정식은 다음과 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & U \\ A_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{7}$$

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 A_n 는 식(6)을 ω 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 A_n 를 회전자 위상각으로 미분한 것이다. 즉 A_n 의 대각·비대각 성분을 회전자 위상각으로 미분한 것이다.

2.2.3 유효전력과 회전자 위상각과의 관계

i 번째 발전기에서 전기적 출력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

또는

$$\Delta P = J_{px} \Delta X \tag{10}$$

위 식(10)으로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\Delta X = (J_{px})^{-1} \Delta P = J_{xp} \Delta P \tag{11}$$

만약 $\Delta P_{ei} \neq 0$ 이라면,

$$\Delta X_i = [J_{xp}]_{ij} \Delta P_j \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \tag{12}$$

이다.

2.2.4 발전기 유효전력과 선로 유효전력과의 관계

네트워크 버스 전압과 발전기 내부 전압과의 관계는 다음과 같다.

$$V = -(Y_{NN}) Y_{NG} E_G \approx C E_G \tag{13}$$

여기서

$$\begin{bmatrix} Y_{NN} & Y_{NG} \\ Y_{NG}^T & Y_{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ E_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_G \end{bmatrix}$$

i 번째 모션에서는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_i = \sum_{k=1}^n C_{ik} E_{G(k)}^- \quad (14)$$

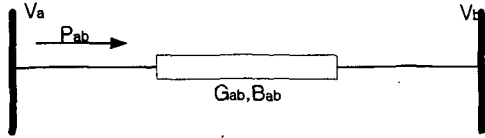


그림 7 Vab 사이의 유효전력
Fig. 7 Active power between two buses

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

2.2.5 임계 선로 선정 알고리즘

- Step 1 : 계통의 선형화를 통해 계통 상태 행렬(2n-2 by 2n-2)을 구성하고 고유치를 계산한다.
- Step 2 : 계산된 고유치로부터 그 고유값 중 제동이 작은 모드들을 우선 선택한 후 주파수가 낮은 모드(1~8Hz)를 불안정한 모드로 선정한다.
- Step 3 : 선정된 고유치에 대한 선로별 고유치 감도 계산한다.
- Step 4 : 안정도 진단이 가능한 선로 선정한다.

2.2.6 시험계통

본 논문에서 제안한 방법을 2-지역 계통(a simple two-area system)에 적용하였다. 모의 프로그램으로는 MATLAB을 사용하였다. 그림 8은 2-지역 계통을 보여주고 있다. 전력계통을 구성하는 발전기는 제어가 없는 고전 모델이다

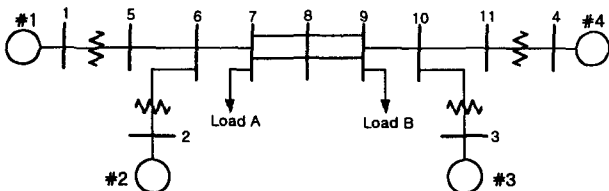


그림 8 2-지역 계통(A simple two-area system)
Fig. 8 A simple two-area system

본 사례 연구의 목적은 주요 임계 파라미터인 유효 전력이 안정도 진단 선로 선정과 밀접한 관계가 있음을 확인하는데 있다. 계통의 선형화를 통해서 구해진 계통 상태 행렬로부터 고유치를 구한다. 2-지역 계통에서 부하 모션 7~9 사이에 흐르는 유효 전력은 계통에 중요한 영향을 미친다. 표 2는 모션 7~8에 유효 전력이 200MW, 300MW, 400MW 흐를 때의 고유값이다.

표 2 2 지역 계통의 고유값
Table 2 Modes of a two-area system

	$\lambda_{1,2}$	$\lambda_{3,4}$	$\lambda_{5,6}$
200MW	$\pm j3.05377$	$\pm j8.87407$	$\pm j8.94562$
300MW	$\pm j2.83321$	$\pm j8.90799$	$\pm j8.97002$
400MW	$\pm j2.35730$	$\pm j8.95629$	$\pm j8.00335$

발전기는 제어가 없는 고전 모델로 표현되었기 때문에 고유치의 제동특성은 표현되지 못한다. 표 3은 모션 7~8의 유효전력에 대한 고유치 감도 즉, $\partial \lambda / \partial P_{78}$ 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.

표 3 모션 7~8의 고유치 감도
Table 3 Eigenvalue sensitivity of bus #7 and 8

	$\partial \lambda_{1,2} / \partial P_{ab}$	$\partial \lambda_{3,4} / \partial P_{ab}$	$\partial \lambda_{5,6} / \partial P_{ab}$
200MW	$\mp j0.16105$	$\pm j0.03263$	$\pm j0.03195$
300MW	$\mp j0.36540$	$\pm j0.08670$	$\pm j0.02006$
400MW	$\mp j0.95970$	$\pm j0.21240$	$\pm j0.02122$

2.3 예측 기법 적용

계통의 전기적 출력 변화와 모션 전압 위상각 변화를 온라인으로 측정하여 실시간으로 동기 탈조 여부를 예측하는 실시간 안정도 기법에는 수치 해석적인 기법이 많이 사용되고 있는데, 단일 구간 내에서 도함수를 추정하는 기법으로는 Euler법, 이를 수정한 Heun법이나 수정 Euler법 그리고 이들 기법들을 포괄하는 Runge-Kutta법 등이 있다. 우리가 관심있는 분야에서는 등간격의 수많은 연속적인 데이터를 처리하여야 하므로 다중구간 방법을 사용한다. 다중 구간 방법은 이전의 값들로부터 얻은 정보를 이용, 계산을 시작한다. 즉 이전의 값들을 연결시키는 선의 곡률에 의해 해의 궤도에 관한 정보를 추정하게 된다. 본 논문에서는 비교적 구현이 용이한 Newton-Cotes 공식[12][13]을 사용하였다.

Step 1 : 보간다항식의 구성

보간다항식을 구하기 위해서 일반적으로 잘 알려진 Newton의 보간다항식을 사용한다. 보간법은 주어진 데이터(좌표)를 지나는 함수를 구성하여 점들 사이의 값을 추정할 수 있도록 하고 있는데 점들을 지나는 함수를 구하므로 여기서의 논점대로 점들 밖의 값 즉, 현재시점 이후의 값들도 예측할 수 있다.

Step 2 : 도함수의 추정

입력되는 이산데이터에 대해 기울기를 나타내도록 환산하고 이 환산값으로 보간법에 의해 도함수를 구성한다. 이 도함수를 필요구간내로 적분하여 필요로 하는 예측값을 구하는 것이다.

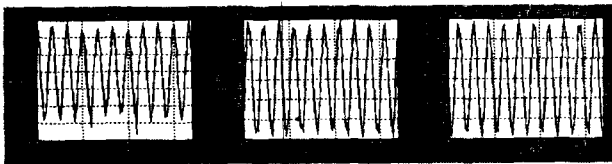
Step 3 : 개선된 Newton-Cotes 공식

$$y_{i+1} = y_i + \frac{1}{n} \int_{i-n+1}^{i+1} f_n(x) dx \quad (15)$$

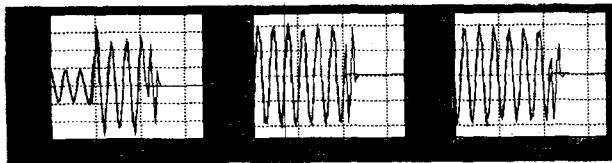
$f_n(x)$ 는 n차 보간다항식

Step 4 : 실제 사고에 예측 기법 적용

그림 9는 실제통에서 취득한 사례데이터를 나타내고 있다. 사고는 345kV로 운전중인 선로의 a상의 지락사고이고 데이터 취득 장치로부터 사고 피더를 발취한 데이터로서 0.5초에 사고가 발생하였고 데이터 취득 샘플링은 1920Hz(0.52ms)이다. 그림 9는 예측 기법을 이용하여 2.6[ms]선행값을 예측한 결과가 원래의 값을 잘 추정하고 있음을 보여주고 있다.



(a) 전압



(b) 전류

그림 9 실제 사고에 대한 예측 결과

Fig. 9 Prediction result for practice fault

개선된 Newton-Cotes법은 기존의 방법에 비해 적은 수의 데이터만으로도 만족할 만한 정확도로 값을 추정할 수 있고 입력데이터의 도함수를 적분해서 추정하기 때문에 예측도중 오차가 크게 벌어지는 경우가 거의 발생하지 않는다. 이 방법의 장점은 예측함수가 단순 이항연산으로 구성되어 있어 계산 속도가 빠르고, 필요로 하는 데이터의 개수가 적으므로 데이터베이스의 부담이 적은점이다. 그러므로 이러한 장점을 이용하면 실제통 온라인 데이터를 다루는데 적합하리라 생각된다. 제시된 방안에 의해 선정된 임계 선로에 GPS 기능이 있는 데이터 취득 장치를 설치하고, 시간 동기화된 운전자료를 온라인으로 측정하여 예측 기법을 적용하면 향상된 계통의 안정도를 얻을 수 있다. 예측한 값이 미리 설정한 한계값을 지나 칠 때는 발전기 탈락등 제어수단을 사용한다.

3. 사례 연구

3.1 과도안정도

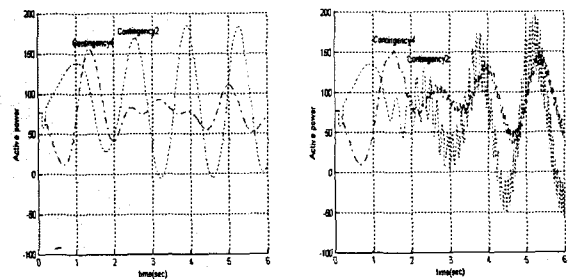
본 논문에서는 2003년 한전 계획 계통에 대해 다루고 있으며, 상정사고는 345kV이상 2회선 3상 지락 사고로 아주 심각한 사고를 고려하였고 SIME법에 의해 계산된 CCT는 표 4에 나타나있다.

표 4 모선 7~8의 고유치 감도

Table 4 Simulation Conditions

사고번호	사고 위치	CCT(sec:cycle)
Contingency 1	7150 ~ 7600	0.0620 (3.72)
Contingency 2	5150 ~ 5600	0.1024 (6.14)
Contingency 3	10300 ~ 10401	0.1196 (7.18)
Contingency 4	6100 ~ 6300	0.1326 (7.96)
Contingency 5	6600 ~ 7101	0.1349 (8.10)

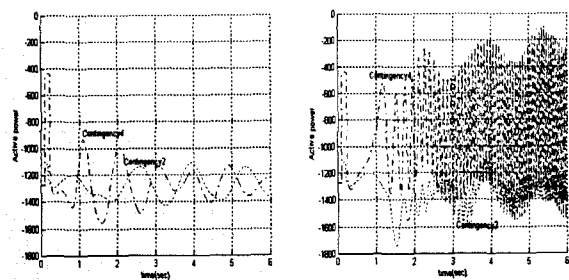
표 5를 바탕으로 탈조와 관련이 있는 선로를 살펴보면, 모선 1700~2500, 4400~6951, 4900~6600 그리고 모선 6450~7155, 7150~7600, 8300~8800등은 다른 모선들보다 TSP 지수 값이 상대적으로 크다. 즉, 선정된 6개의 선로는 다른 상정 사고시에도 발전기 탈조 여부와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 그림 10은 탈조 여부와 민감한 선로(모선 8300~8800)의 유효전력을 보여주고, 그림 11은 탈조 여부와 민감한 선로(모선 4400~6951)의 유효 전력을 보여주고 있다. 따라서, 모선 4400~6951의 조류가 모선 8300~8800의 조류보다 발전기의 탈조 여부와 더욱 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.



(a) CCT전의 유효전력 (b) CCT 때의 유효전력

그림 10 둔감한 선로의 유효전력의 시간에 따른 변화

Fig. 10 Active power of impassive transmission lines



(a) CCT전의 유효전력 (b) CCT 때의 유효전력

그림 11 민감한 선로의 유효전력의 시간에 따른 변화

Fig. 11 Active power of sensitive transmission lines

3.2 미소신호안정도

사례연구에는 PSS/E에서 제공된 6기 20모선 시험계통으로서 시험계통의 발전기는 제어가 없는 고전 모델로 표현되어서, 고유치에서 제동특성은 표현되지 못한다.

표 5 한전계통의 TSP지수

Table 5 Priority list w.r.t. transient stability

From	To	Contingency 1	Contingency 2	Contingency 3	Contingency 4	Contingency 5
1700	2500	538.1	4565.7	425.5	772.5	1288.4
2400	2600	6444.4	6352.3	6669.3	1521.1	4467.6
2400	3600	2194.1	6499.3	823.6	1935.6	495.5
3350	3800	2243.2	5721.1	2893.3	7419.4	2195.6
4100	4700	4946.1	6296.2	8642.8	2245.7	6173.1
4400	4450	5089.8	3753.7	7322.5	7927.6	5053.4
4400	4600	3211.9	9307.8	3577.4	2663.7	2113.3
4400	6951	171.1	21072.6	171.1	171.1	12782.9
4900	6600	3243.7	47336.3	1247.5	18007.3	1247.5
5150	5155	2588.6	4215.1	4215.1	7510.4	4380.1
5155	5500	2853.8	2711.8	2711.8	7881.9	6394.9
5600	5700	4034.1	4792.4	4792.4	7536.9	4104.6
6020	6030	6357.9	17892.5	5439.1	5439.1	3822.3
6100	6900	4147.8	9892.1	3413.1	182918.2	2443.7
6150	6950	4129.8	6782.9	3897.5	7075.9	2636.5
6300	6900	3523.4	6892.5	2832.8	1973.2	1973.2
6300	6950	6837.6	18626.6	6930.3	4941.2	4941.2
6450	7155	17757.1	4577.1	21859.5	23755.4	23755.4
7150	7155	622.6	4610.7	1621.1	2339.4	2339.4
7150	7600	12247.5	11564.4	11564.4	21623.4	21623.4
7250	7900	1792.2	1163.6	1001.9	1455.1	1455.1
8150	8155	3231.2	4733.2	5931.2	1955.1	5585.5
8156	8250	1792.4	8527.4	5709.6	2667.1	12001.8
8300	8800	3104.1	3101.4	9638.1	2157.8	3118.7
8600	8800	17036.6	7539.5	37815.3	5342.1	34922.6
10300	10350	7803.3	7803.3	2979.6	6577.5	6577.5
10301	10700	4922.4	4922.4	5386.8	18966.9	18966.9

표 6 6기 20모선 계통의 고유값

Table 6 Modes of a 6-generator 20-bus test system

고유치	ω [rad/s]	f [Hz]	T[s]
$\lambda_{1,2}$	$\pm j1.645E+02$	$\pm 1.645E+02$	26.1904
			0.1886
$\lambda_{5,6}$	$\pm j1.274E+02$	$\pm 1.274E+02$	20.2714
			0.0493
$\lambda_{7,8}$	$\pm j1.089E+02$	$\pm 1.089E+02$	17.3343
			0.0577
$\lambda_{9,10}$	$\pm j1.129E+02$	$\pm 1.129E+02$	17.9615
			0.0557

표 7 6기 20모선 계통의 고유치 감도

Table 7 Eigenvalue sensitivity of modes 3 & 4

	모선154~3008	모선204~205	모선201~202
$\partial\lambda_{3,4}/\partial P_{ab}$	$\pm j2.103E-6$	$\pm j2.498E-7$	$\pm j5.676E-7$

표 6은 계통의 선형화를 통해 구해진 계통 상태 형렬로부터 고유치를 구한 값이다. 고유값 중 저주파수 모드(1~8Hz)를 불안정 모드로 선정하므로 주파수가 5.5366[Hz]인 3,4 모드 불안정 모드로 선정한다. 표 7은 선정된 불안정 모드($\lambda_{3,4}$)에 대한 고유치 감도 즉, $\partial\lambda_{3,4}/\partial P_{78}$ 을 구한 값이다. 결과적으로 표 1·6·7을 통해서 모선 154~3008이 모선 204~205보다 상대적으로 발전기 탈조와 민감한 선로임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 최근 큰 관심을 모으고 있는 온라인 안정도 해석에 있어 필요한 임계 선로 선정 방안을 과도 안정도와 미소 신호 안정도 관점에서 다루고 있다. 과도 안정도에서는 제안된 TSP지수에 의하여 탈조하는 발전기와 관련 있는 선로를 선정하였다. 제시된 방안은 시험계통(6기20모선)과 한전 2003년 계획 계통에 적용하여 TSP지수가 상대적으로 큰 선로가 탈조에 민감한 선로임을 알 수 있다. 미소 신호 안정도에서는 시스템 파라미터인 선로 조류를 고유치 감도 파라미터로 사용하여 계산하였다. 제시된 방안을 2-지역 계통과 시험계통(6기20모선)에 적용하여 유효전력이 고유치에 영향을 줄 수 있음을 알 수 있고, 미소 신호 안정도 개념에서의 선로선택이 가능함을 알 수 있다. 본 논문에서 제시된 방안에 의해 선정된 임계 선로에 GPS를 설치하고, 시각 동기화된 운전자료(선로 조류)를 온라인으로 측정하여 예측 기법 (개선된 Newton-Cotes 법)을 적용하면 향상된 계통의 안정도를 얻을 수 있다. 최근의 전력계통은 여러 가지의 제어기기들의 도입으로 급변하고 있다. 따라서 2축 모델링(two-axis model)하고 제어기를 추가하여 모드의 계통특성에 영향을 미치는 선로의 선정 방안을 연구할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 인프라구축지원사업을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y.S. Cho, G.S. Jang, S.H. Kwon, Y. Wang, "Identification of Correlative Transmission Lines for Stability Prediction", ICEE 2001, Vol 1, pp 300-303, 2001. 7.22-26
- [2] Taylor C.W., "The future in on-line security assessment and wide-area stability control", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , Volume: 1 , 2000
- [3] Ota H, Kitayama Y, Ito H, Fukushima N, Omata K, Morita K, Kokai Y, "Development of transient stability control system (TSC system) based on on-line stability calculation", Power Systems, IEEE Transactions on , Volume: 11 Issue: 3 , Aug. 1996
- [4] J. Lee, B. Lee, S.-H. Kwon, H.-K. Nam, T. Ahn, J.-B. Choo, K. Yi, "A Contingency Screening Algorithm Using SIME for Transient Stability Assessment of the KEPCO System", Journal of KIEE, 11(1), pp 55-61, 2001
- [5] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", IEEE Press, 1994
- [6] A.A Fouad and Vijay Vittal, " Power System Transient Stability Analysis Using The Transient Energy Function Method", Englewood Cliffs, New Jersey:Prentice-Hall, 1992
- [7] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [8] P.W. Sauer and M.A. Pai, "Power System Dynamics and Stability", Prentice-Hall, 1998
- [9] Jang, G. "Nonlinear control design for stressed power systems using normal forms of vector fields", Ph.D. Thesis, Iowa State University, Ames, Iowa, 1997
- [10] PSS/E Application Manual, Power Technologies, Inc., 1995
- [11] Y. Ohura, M. Suzuki, K. Yanagihashi, M. Yamaura, K. Omata, T. Nakamura, S. Mitamura, H. Watanabe, "A Predictive Out-Of-Step Protection System Based on Observation of the Phase Difference between Substations", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No.4, PP. 1695 ~ 1704, November 1990
- [12] Patel, "Numerical analysis", Saunders College Publishing, 1994
- [13] M.J. Maron, "Numerical analysis", Macmillan Publishing, 1982

저 자 소 개



조 윤 성(趙尹晟)

1977년 7월 5일생. 2000년 광운대학교 전기공학과 졸업. 2002년 고려대학교 전기공학과 졸업(석사). 2002~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 02) 3290-3803

Fax : 02) 3290-3692

E-mail : ysjjo@elec.korea.ac.kr



장 길 수(張吉洙)

1967년 10월 26일생. 1991년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 졸업(석사). 1997년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학박사). 1997년~1998년 미국 Iowa State Univ. Scientist. 1998년~2000년 한전 전력연구원 선임연구원. 현재 고려

대학교 전기 공학과 부교수

Tel : 02) 3290-3246

Fax : 02) 3290-3692

E-mail : gjang@elec.korea.ac.kr



권 세 혁(權世爨)

1949년 5월 14일생. 1974년 서울대학교 공업교육과(전기공학) 졸업. 1976년 서울대학교 교육대학원 공업교육과 졸업(석사). 1980년 미국 Iowa State Univ. 졸업(석사). 1984년 미국 Iowa State Univ. 졸업(공학박사). 현재 고려대학교 전기 공학

과 교수. 2002년~현재 전력시스템기술연구센터 센터장

Tel : 02) 3290-3220

Fax : 02) 3290-3692

E-mail : shkwon@elec.korea.ac.kr