

공진 조건을 이용한 미소신호 안정도 해석

조성진 · 장길수 · 윤태웅  
고려대학교 전기전자전파공학부

Analysis of small signal stability using resonance condition

Sungjin Cho · Gilsoo Jang · Tae-woong Yoon  
School of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - Modern power grids are becoming more and more stressed with the load demands increasing continually. Therefore large stressed power systems exhibit complicated dynamic behavior when subjected to small disturbance. Especially, it is needed to analyze special conditions which make small signal stability structure varied according to operating conditions. This paper shows that the relation between small signal stability and operating conditions can be predicted well using node-focus point and 1:1 resonance point. Also, the weak point which limits operating range can be identified by the analysis of resonance condition. The proposed method is applied to test systems, and the results illustrate its capabilities.

1. 서 론

현대 전력계통은 지속적인 부하의 증가로 많은 전력 설비가 가용 한계점에서 운용되는 이른바 압박된 상태에서 운전되고 있다. 한 예로 전력회사간의 대규모 전력 거래가 가지는 경제적인 잇점은 미국에서 1971년 이후 전력회사간의 전력 거래량을 두 배가 넘도록 하였으며 이러한 경향은 전력산업의 경쟁제체 도입으로 더욱 심화되었다. 그리고 각 회사가 막대한 투자비가 소요되는 송전설비의 확충을 꺼리는 상황에서 전력 설비 특히 송전설비들을 최대한 그 한계용량에 가깝게 운전하고 있다[1].

부하의 증가가 설비의 증가를 앞지르는 현상 하에서 이러한 경향은 계속될 것이며, 이러한 전력계통에서는 작은 외란에 의해서도 연쇄적인 사고의 파급을 통해 대규모 정전사태가 발생할 수 있다. 따라서 일상적인 계통 운전에서 발생하는 작은 변화에 대한 계통의 응답에도 주목하지 않을 수 없다. 특히 운전 조건 변동에 따라 시스템의 미소신호 안정도 구조(structure)가 달라지는 특수한 조건에 대한 해석이 요구된다.

본 논문에서는 접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)에 대해 논하고, 이를 1기 무한모선 시스템과 3기 9모선 시스템에 적용하여 미소신호 안정도를 예측할 수 있음을 제시하고자 한다. 또한 공진 조건을 이용한 취약지구(weak point)선정 방법을 제시하여 그 유용성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 전력계통 모델링

시스템의 안정도를 연구하기 위해서는 발전기와 부하에 대한 적절한 모델이 필요하다. 예를 들면, 다음과 같은 모델을 사용할 수 있다[2].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= F(x_1, x_2, y) \\ 0 &= G(x_1, x_2, y) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $x_1$ 은 상태변수 벡터,  $x_2$ 는 대수변수 벡터,  $y$ 는 시스템 파라미터이다. 함수  $F$ 는 발전기와 여자기 및

부하를 나타내고, 함수  $G$ 는 고정자와 내·외부 네트워크 모델을 나타낸다. 이 모델은 비선형 방정식들이기 때문에 미소신호 안정도 관점에서 접근하려면 식 (1)을 초기 운전점(평형점)에서 선형화 하여 시스템 행렬을 구해야 된다. 이를 표현하면 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $J_{11}$ 은  $\partial F/\partial x_1$ ,  $J_{12}$ 는  $\partial F/\partial x_2$ ,  $J_{21}$ 은  $\partial G/\partial x_1$ ,  $J_{22}$ 은  $\partial G/\partial x_2$ 이다. 이 모델의 변수들은 2.3절 사례 연구에서 사용될 데이터들을 나타낸다.

2.2 접속점과 1:1 공진점

일반적인 비선형 시스템에서 평형점의 안정도는 선형화 시스템의 고유치들에 의해 결정이 된다. 어떤 실수 고유치가 0이 될 때 혹은 한 쌍의 복소 고유치들이 허수축에 있을 때 시스템은 임계상태에 도달하게 되는데, 전자를 정적 분기(static bifurcation) 후자를 호프 분기(hopf bifurcation)라고 일컫는다[3]. 이러한 분기이론이 시스템 공학자나 설계자들에게 중요한 이유는 평형점(equilibrium point)의 안정도에 영향을 주는 조건들이기 때문이다.

한편 접속점은 한 쌍의 복소 고유치들이 두개의 실수 고유치들로 되는 점을 뜻하고 1:1 공진점은 두 쌍의 복소 고유치들에서 각 쌍의 복소 고유치들이 각각 서로 같은 두개의 복소 고유치들로 되는 점을 의미한다. 이를 그림으로 나타내면 다음과 같다.

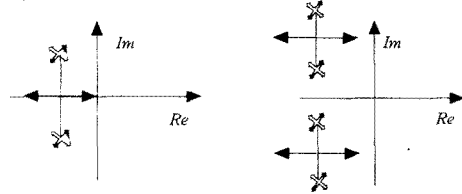


그림 1. 접속점

그림 2. 1:1 공진점

본 논문에서는 접속점과 1:1 공진점이 평형점의 안정도에 직접적으로 영향을 주진 않지만, 다음과 같은 이유에서 중요하다.

- 접속점 주위에서는 시스템이 과제동(over damping)이 되거나 과소 제동(under damping)이 된다. 또한 1:1 공진점 부근에서는 시스템이 비선형으로 진동한다[4].
- 이 점들에서는 고유벡터가 유일하지 않고, 그들 자신의 물리적 의미를 잃어버리기 때문에 참여인수(participation factor)와 고유벡터 그리고 잔류항(residues)들에 오류가 생길 수 있다[4, 5].
- 시스템 파라미터 변화에 따라 고유치가 상당히 민감하다[4, 6].

따라서 고유벡터와 관련된 시스템 해석적인 측면과 고유치의 민감도와 관련된 시스템 특성을 고려해볼 때, 접속점과 1:1 공진점은 미소신호 안정도를 예측할 수 있는 기준이 됨을 알 수 있다.

### 2.3 사례연구

본 논문의 목적은 접속점과 1:1 공진점을 이용해 미소신호 안정도를 예측할 수 있음을 보여주는 것이다. 이를 시험하기 위해 널리 사용되고 있는 1기 무한모션 시스템과 3기 9모션 시스템을 이용하였다. 이 때 사용한 시뮬레이션 툴(tool)은 MATLAB과 PSS/E이다.

#### 2.3.1 1기 무한모션 시스템

1기 무한 모션 전력계통 시스템의 선형화 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_D & -K_S \\ \frac{2H}{\omega_0} & \frac{2H}{\omega_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \Delta\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2H} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta T_m \quad (3)$$

여기서  $K_S$ 는 동기화 토크 상수,  $K_D$ 는 제동 토크 상수,  $H$ 는 관성상수,  $\Delta\omega_r$ 는 속도변화,  $\omega_0$ 는 377 rad/s의 크기를 갖는 회전자 상수이다. 이 시스템에 대한 예제 시스템을 이용해서 부하 변동에 따른 공진 조건을 고찰할 것이다. 예제 시스템은 다음 그림 3과 같다.

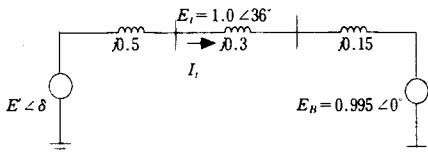


그림 3. 1기 무한 모션 전력시스템의 예제(7)

이 시스템에 대한 방정식들은 다음과 같다.

$$X'_d = 0.3, X_T = 0.95, E_1 = E_1 \angle 36^\circ, I_1 = \frac{(P + jQ)^*}{E_1^*}, H = 1.5$$

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + jX'_d \vec{I}_1, \vec{E} = E \angle \delta, \delta_0 = \delta + 36^\circ, K_S = E' \frac{E_B}{X_T} \cos \delta_0$$

결국  $K_S$ 는  $P, Q$ 값에 따라 결정되는 것을 알 수 있다.  $K_D$ 는 임의의 제동상수이다.  $K_D$ 값의 변화에 따른 공진 발생 범위와 운전 조건 변화에 따른 공진 발생 범위를 표 1과 표 2로 나타내었다. 여기서  $P, Q$ 값들의 범위는 다음과 같다.

$$0.5 \leq P \leq 1.2, -0.1 \leq Q \leq 0.6$$

표 1. 제동상수 변화에 따른 공진 발생범위

운전조건	$K_S$	$K_D$
P=0.5 Q=0.3	0.8313	61~62
P=0.6 Q=0.3	0.8128	60~61
P=0.7 Q=0.3	0.7943	59~60
P=0.8 Q=0.3	0.7758	59~60
P=0.9 Q=0.3	0.7574	58~59
P=1.0 Q=0.3	0.7389	57~58
P=1.1 Q=0.3	0.7204	57~58
P=1.2 Q=0.3	0.7020	56~57

표 2. 운전조건 변화에 따른 공진 발생범위

$K_D$	$K_S$
53	0.6188 ~ 0.6372
54	0.6372 ~ 0.6627
55	0.6511 ~ 0.6811
56	0.6766 ~ 0.7111
57	0.7020 ~ 0.7365
58	0.7274 ~ 0.7619
59	0.7528 ~ 0.7874
60	0.7782 ~ 0.8128

표 1에서는 주어진 임의의 제동 상수에 대해 공진이 일어날 때의 동기화 토크 상수 값의 범위를 제시하고 있다. 제동 상수가 커짐에 따라 동기화 토크 상수 값의 하한이 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 공진이 일어날 때 이 토크 상수 값의 범위의 크기는 거의 일정한 값을 가지고 있다(평균 0.032). 동기화 토크 상수 값은 동작 조건( $P, Q$ )에 의해 결정되기 때문에 공진이 일어날 때의 범위를 피하도록 동작 조건을 설정해야 된다.

표 2에서는 임의의 동작 조건에서  $P$ 값이 커짐에 따라 사용자가 선택할 수 있는 제동 상수 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 즉 부하가 커짐에 따라서 선택할 수 있는 제동 상수 값이 작아짐을 알 수 있다. 이는 고유치가 좌평면(left half plane)에 있도록 제동 상수 값을 정하는데 하나의 제한 요소로 작용함을 보여준다.

#### 2.3.2 3기 9모션 시스템

3기 9모션 시스템을 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.

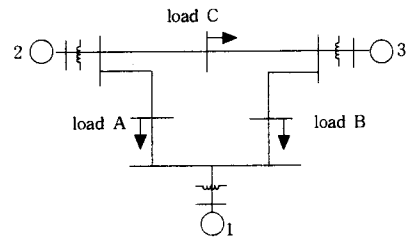


그림 4. 3기 9 모션 전력시스템 다이어그램

각 발전기와 부하 및 시스템 데이터를 표로 나타내면 다음과 같다[8].

표 3. 발전기 및 부하의 P-Q 데이터

	발전기			부하		
	1번	2번	3번	A	B	C
P	71.6	163	85	125	90	100
Q	27	6.7	-10.9	50	30	35

표 4. 시스템 데이터

발전기	1번(교전모델)	2번(이축모델)	3번(이축모델)
Rated MVA	247.5	192.0	128.0
Type	hydro	steam	steam
$x_d$	0.1460	0.8958	1.3125
$x'_d$	0.0608	0.1198	0.1813
$x_e$	0.0969	0.8645	1.2578
$x'_e$	0.0969	0.1969	0.25
Stored energy at rated speed	2364 MW · s	640 MW · s	301 MW · s

표 3,4의 데이터들을 PSS/E에 알맞은 조류계산 데이터와 동적 데이터로 구성하여 시뮬레이션을 수행한다. 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

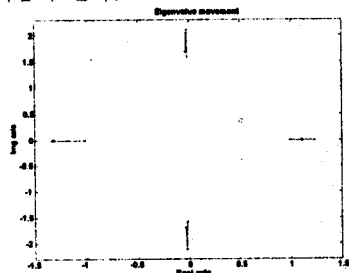


그림 5. 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임

그림 5에서 나타난 고유치의 변화를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 5. 운전조건 변동에 따른 임계 고유치 움직임

P, Q (%)	Eigenvalue	
	Real	Imaginary
0	0.18097E-01	1.5758
	-0.18097E 01	1.5758
10	-0.19830E 01	1.7728
	0.19830E 01	1.7728
20	0.21904E 01	1.9208
	-0.21904E 01	1.9208
30	0.23789E 01	2.1227
	-0.23789E 01	2.1227
40	1.0170, 0.99029	0
50	-1.1305, 1.0279	0
60	0.97753, -1.1462	0
70	1.2498, 1.3542	0
80	-0.30934E 01	1.6959
	0.30934E 01	1.6959
90	-0.31829E 01	2.0253
	0.31829E 01	2.0253
100	1.1093, 1.3227	0
110	-0.22655E 01	2.0788
	0.22655E 01	2.0788
120	0.51102	0.36136
	-0.51102	0.36136

전체 부하의 변동에 따른 공진 조건을 분석하면 표 5와 같다. 이를 통해 P, Q값의 증가량이 30%에서 40% 사이에 있을 때 공진이 발생함을 알 수 있다.

마지막으로 국소 부하의 변동에 따른 공진 조건을 분석하려고 한다. 이를 위해 취약지수라는 것을 다음과 같이 정의한다.

$$P_{Cf} = \frac{P_{Gr}}{P_C}, P_{Lf} = \frac{P_{Lr}}{P_L} \quad (4)$$

여기서  $P_{Cf}$  발전기의 취약지수,  $P_{Lf}$ 는 부하의 취약지수,  $P_{Gr}$ 는 공진이 일어나기 직전 전체 발전기 P값,  $P_{Lr}$ 는 공진이 일어나기 직전 전체 부하 P값,  $P_C$ 는 초기 전체 발전기의 P값,  $P_L$ 는 초기 전체 부하의 P값이다.

취약지수는 초기 부하(혹은 발전기)의 P에 대한 공진이 발생하기 직전 부하(혹은 발전기)의 P를 의미한다. 즉, 허용 가능한 부하의 증가량을 지수로 나타낸 것이다. 국소 부하의 증가량에 대해 하나의 발전기만 발전량을 담당한다고 가정하고 시뮬레이션을 수행한다. 이에 대한 결과를 표로 나타내면 다음과 같다.

표 6. 전체 부하와 국소 부하의 취약지수 비교

		부하 A	부하 B	부하 C
2번 발전기	$P_{Cf}$	1.27378	1.30976	없음
	$P_{Lf}$	1.27778	1.31429	없음
3번 발전기	$P_{Cf}$	1.27378	1.30976	없음
	$P_{Lf}$	1.27778	1.31429	없음
전체 발전기	$P_{Cf}$	1.3		
	$P_{Lf}$	1.3		

표 6을 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. 2번 발전기의 P와 부하 A의 P를 각각 10%씩 증가시켰을 때 발전기와 부하의 취약지수를 구하면 약 1.27로 값이 동일하게 나온다. 또한 2번 발전기의 P와 부하 C의 P를 각각 10%씩 증가시켰을 때 공진이 일어나지 않음을 알 수 있다. 2번 발전기 대신 3번 발전기를 이용해 결과를 분석하면 2번 발전기와 동일한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 총 부하의 P를 10% 증가시키면 따라 총 발전기의 P도 10% 증가시키면 발전기와 부하의 취약지수가 1.3으로 같게 나온다. 이는 부하 A를 취약지수로 선정할 수 있음을 보여준다.

따라서 전체 부하의 증가에 따른 공진 현상과 더불어

국소 부하가 증가하였을 때 공진이 일어남을 알 수 있다. 또한 취약지수를 이용해 전체 부하량 보다도 적은 부하량에서 공진이 일어날 수 있음을 알 수 있다. 이를 통해서 공진 조건을 이용해 취약지수를 선정할 수 있음을 보여준다.

### 3. 결 론

접속점(node-focus point)과 1:1 공진점(1:1 resonance point)을 이용하여 미소신호 안정도와 운전조건과의 관계를 예측할 수 있음을 사례연구를 통해 확인하였다. 특히 1기 무한모션 시스템의 경우에는 부하의 변동 뿐만 아니라 제동상수의 변화에 따라서 공진이 발생함을 확인하였고, 이는 전력계통 제어기나 여자기의 이득변화에 따라 공진이 발생할 수 있다는 가능성을 제시하였다. 그리고 전력계통에 여러 개의 부하들이 존재할 수 있다는 점을 감안할 때, 공진 조건이 취약지수(weak point) 선정 방법이 될 수 있다는 점을 3기 9모션 시스템의 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였다.

따라서 이 결과를 바탕으로 여자기와 PSS를 포함한 전력계통 공진 해석, 부하 변동에 따른 공진점을 효율적으로 찾기 위한 알고리즘 개발 및 취약지수(weak point) 문제 해결 방안에 대한 연구가 진행중이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-013-3) 지원으로 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Phenomena-Voltage Stability & Security," Proc. of Voltage Stability & Security, September, 1988, Keynote.
- [2] Y. V. Makarov, Z. Y. Dong, and D. J. Hill, "A General Method for Small Signal Stability Analysis," IEEE Transactions on Power Systems, vol 13, no. 3, August, 1998
- [3] R. Seydel, Practical Bifurcation and Stability Analysis from equilibrium to chaos, New York: Springer-Verlag, 1994
- [4] B.-J. Lee, V. Ajjarapu, "A piecewise global small-disturbance voltage stability of the structure-preserving power system model," IEEE Trans. on Power Systems, vol 10, no. 4, November, 1995
- [5] M. Klein, G. J. Rogers, S. Moorthy, and P. Kunder, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," IEEE Trans. on Power Systems, vol 7, no. 3, September, 1992
- [6] B.-J. Lee, A unified framework to study the voltage stability of the structure-preserving power system model, Ph D. thesis, Iowa State University, 1994
- [7] P. Kunder, Power System Stability and Control, New York: McGraw-Hill, 1994
- [8] P. M. Anderson, A. A. Fouad, Power System Control and Stability, New York: IEEE PRESS, 1994