

전력계통의 저주파진동현상해석에 관한 연구

송길영 권세혁* 장방현
고려대학교 고려대학교* 고려대학교

A Study on Low Frequency Oscillations in Electric Power Systems.

KIL-YEONG SONG SAE-HYUK KWON BANG-HYUN CHANG
KOREA UNIVERSITY KOREA UNIVERSITY KOREA UNIVERSITY

ABSTRACT

ABSOPS computer program is designed to find those eigenvalues of a linear dynamic system model which most strongly characterize oscillations between generator rotors. The low frequency oscillation actually occurred in October, 1986 in Korean Electric Power Corporation (KEPCO) System. 28 oscillation modes are identified through computer runs and two of them are calculated unstable in the case of the start of a pumped-storage unit. This program is considered to complement the conventional PSS/E stability program for the stability study of KEPCO system.

I. 서론

미국의 서부 전력계통, 중서부 전력계통 등의 대전력계통 및 대만, 이태리 등의 중적전력계통(Longitudinal System)등에서는 특정계통조건에서 자발적인 저주파진동현상(Spontaneous low frequency Oscillation)이 큰 문제가 되고 있다. 저주파진동의 진폭이 시간에 따라 커지게 되면 정상적인 계통운전이 불가능해지게 되고, 때때로 계통이 분할되는 등의 문제점이 보고되고 있다.[4]

우리나라의 경우, '86년 8월 태풍 배라호의 내습으로 영.호남지역을 연결하는 345KV 주요 간선 계통인 부마 T/L(북부산-신마산)이 운전정지됨에 따라 계통이 안정도상 취약한 상태로 운용되던 중, '86년 10월 345KV 서대구 T/L(서대구-신옥전) 1회선 정지 및 심야 양수 발전기 기동, 정지시에 저주파진동현상(Low Frequency Oscillation)이 간헐적으로 발생하여 상당시간(10-15분) 지속되는 계통 불안정 현상을 경험한 바 있다.[5] 한국전력 발전기에서는 이때의 상황을 전력계통용 해석프로그램 PSS/E로 시드레이선하여 그결과 분석을 보고서로 정리한 바 있다. 그러나 PSS/E시드레이선 결과로는 시간영역해석이므로 실제의 계통요란에 구체적으로 어떤 진동모드가 존재하며, 각모드가 어느만큼 안정, 불안정인지를 판별하기에는 어려움이 있었다. 미국의 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 Westinghouse연구진에서 용역을 주어 개발된 ABSOPS(Analysis of Essentially Spontaneous Oscillations in Power Systems) 프로그램은 주파수 영역으로 저주파진동모드를 계산할수 있도록 되어 있다.

저주파 진동현상을 모델링할 경우 전력 계통의 자발적인 진동현상은, 과도 안정도 문제와 같이 계통의 고장, 대규모 부하이전, 대용량 발전기의 탈락등의 교환 규모가 큰 경우와는 달리, 교환 규모가 적은 경우의 현상이므로 발전기의 회전자 진동의 제동 현상을 선형계통모델로서 연구할 수 있다.

주파수 영역에서 선형계통을 수학적으로 나타낸 수식에서 구한 고유치(eigenvalue)를 이용하여 저주파진동 현상을 해석한 ABSOPS 프로그램은 아래와 같은

세 가지 관점에서 동태안정도 해석을 하는 데 효율적인 도구로 인정된다;

1. 시간 영역 해석시에는 발전기 회전자의 많은 진동 모드가 서로간에 섞여 있으나, ABSOPS에서는 각 모드가 서로 분리되어 구하여진다.
2. 각 모드에 연관된 고유치는 진동 주파수와 제동 정도를 정확하게 나타내며 또한 운전조건의 변화와 현 계통 설계에 민감하다.
3. 각 모드 별 발전기 속도 변분치(generator speed deviations)는 진동을 물리적으로 표현해준다.

주파수 영역해석을 기초로 한 본 프로그램은 시간 영역해석을 기초로한 기존의 과도안정도 해석프로그램(Transient Stability Analysis Program)과 서로 상호관계(Complement)을 이루어, 앞으로의 안정도계산 결과의 신뢰성을 증진시킬수 있을것으로 사료된다.

II. 외국의 저주파진동현상 연구사례

저주파진동현상해석의 구체적인 사례를 들면 대만 전력에서 1984년 2월 28일, 3월 1, 3, 및 7일에 발생한 저주파진동현상을 들수 있다.

대만의 경우는 북부, 중부, 남부지역등 3개의 지역으로 대분하여 발전력의 81%가 북부에 편재되어 있으며, 345KV 송전선을 통하여 중부 및 남부지역에 전력이 공급되고 있다. 대만에서 발생한 저주파진동현상은 off-peak때 발생하였으며 정상발전력 950 MW를 중심으로 최대진폭 70MW의 진동이 발생하였다. 이현상은 약 15분 정도 지속되었다.

이 때 전기기계진동모드를 계산한 중에서 가장 감쇄특성이 나쁜 진동모드는 가장 저주파의 진동모드로서 고유치가 $-0.0151 + j7.2443$ (1.153Hz)로 판별되었다. 그리고 전력계통안정기(Power System Stabilizer)를 삼기 진동모드의 감쇄특성을 개선하도록 삼수설정(Parameter Setting) 및 설치강조 결정에 대한 연구를 한바 있다.[4]

우리나라의 경우도 원자력발전소에 대한 의존도가 계속 높아지고 있는 실정이고 이들 발전소는 영호남지역에 편재되어 있어, 부하밀집지역인 경인지역으로 전력조류가 복잡하고 있으므로 대만전력의 사례는 앞으로도 매우 유익한 비교대상 및 검토대상이 되리라고 생각된다.

III. 주파수 영역해석

과도안정도 해석프로그램에서는 비선형 미분방정식을 시간영역에서 수치적으로 풀어서 계통변수들의 시간적인 변화를 구할수 있었으나, 동태안정도의 관점에서는 선형화한 방정식의 정상해에서 발전기 회전자와 관련된 저주파진동의 고유치를 구한다. 발전기-무한모선계통을 나타내는 고전적인 모델을 사용하여 고유치를 구하는 정확한 공식을 유도하고, 발전기를 좀더 구체적으로 나타낸 발전기-무한모선

계통의 고유치는 반복계산하여 구할 수 있도록 하였다.[3]

III-1. 고전발전기-무한모선모델

그림 1은 발전기-무한모선계통을 나타낸것이다. 여기서 발전기는 고전모델(Classical Model)로 모델링 한것이다. 즉 직축과도리액턴스 X'd 뒤에 정전압전원으로 나타낸다. X_e는 발전기단자와 무한모선을 연결하는 송전선의 리액턴스이다. 발전기 내부전압 (V')와 무한모선전압 (V)사이의 각도를 δ로 표시하였다. 이계통의 동요방정식(Swing Equation)은 다음과 같은 비선형미분방정식으로 표시된다. 여기서 p는 미분연산자(d/dt)를 나타낸다.

$$\frac{2H}{W_B} p^2 \delta + \frac{D}{W_B} p \delta + \frac{VV' \sin \delta}{X'd + X_e} = T_m \quad (1)$$

여기서 H는 발전기의 Inertia Constant (P.U)이고 계통계수 (P.U)이다. W_B는 공칭전각속도 (rad/sec)이며 우리나라의 경우는 60Hz 계통이므로 377rad/sec이다. T_m은 발전기와 직결된 터빈에 들어오는 기계적 토크트르크 (P.U)이다. 터빈토크에 변화가 없다고 보면 δ₀의 부하각을 중심으로 선형화 할수 있다.

$$\frac{2H}{W_B} p^2 \Delta \delta + \frac{D}{W_B} p \Delta \delta + \frac{VV' \cos \delta_0 \Delta \delta}{X'd + X_e} = 0 \quad (2)$$

위에서 Δδ는 δ₀에서의 미소변동량이다. 식 (2)의 우변에 외부토크트르크의 증분 Tx를 추가하고 정리하면 다음과 같다.

$$[(p+\alpha)^2 + \beta^2] \Delta \delta = \frac{W_B}{2H} T_x \quad (3)$$

여기서

$$\alpha = \frac{D}{4H}$$

$$\beta = \frac{KW_B - D^2}{2H - 16H^2}$$

$$K = \frac{VV' \cos \delta_0}{X'd + X_e}$$

미소증분을 표시하는 기호Δ를 생략하고 δ를 δ₀를 중심으로한 미소증분을 의미하는 것으로하고 식 (3)을 Laplace 변환하면 식 (4)와 같다.

$$\delta(s) = \frac{W_B T_x(s)}{2H[(s+\alpha)^2 + \beta^2]} \quad (4)$$

각 속도의 미소변화량을 W라고하면 pδ = W_BW의 관계가 있으므로

$$W(s) = \frac{sT_x(s)}{2H[(s+\alpha)^2 + \beta^2]} \quad (5)$$

로 표시할 수 있다.

외부토크트르크가 주파수 Ω의 정현파라고 가정하면 정상상태에서의 해를 구하기 위해서는 s를 jΩ로 대치하여야 한다. 각속도를 기준으로 잡으면 여기서 T_x(jΩ)는 복소수로 표시할수 있다.

$$W = W_r + j0$$

$$T_x = T_{xr} + jT_{xi} \quad (6)$$

그러면

$$W_r = \frac{jn(T_{xr} + jT_{xi})}{2H[(\alpha + jn)^2 + \beta^2]} \quad (7)$$

식 (7)을 정리하면 다음과 같은 관계를 얻을수 있다.

$$\alpha = \frac{T_{xr}}{4HW_r}$$

$$\beta^2 = \Omega^2 - \frac{T_{xi}}{2HW_r} - \left[\frac{T_{xr}}{4HW_r} \right]^2 \quad (8)$$

식 (8)에 의하여 식 (2)의 고유치 (-α ± jβ)의 정확한 값을 구할수 있다.[2],[3]

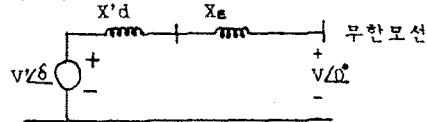


그림 1. 발전기-무한모선계통

III-2. 고차의 발전기-무한모선모델

발전기자체를 모델링하는 방법도 가장 간단한 고전모델을 포함하여 5개의 모델이 있으며, 발전기-터어빈 계통을 모델링하는 경우도 터어빈이 고압, 중압, 저압의 단계로 이루어져 있고 각 단계를 연결하는 샤프트가 강체가 아닌 경우에는 고차의 미분방정식으로 나타낼수 있다. 만약 발전기 및 터어빈을 제어하는 전압조정기, 속도조정기 및 전력계통안정기등의 제어계통까지를 고려한다면 많은 실수, 복소수의 고유치를 얻을수 있다. 여기서 발전기의 회전자들의 전기기계적저주파진동이 관심의 대상이므로 다른 고유치들보다도 회전자에 기인한 고유치가 각 제어기들의 정상수들 및 동작조건에 어떻게 영향을 받는가를 파악할 필요가 있다.

식 (5)는 고전발전기-무한모선모델에 대해서 성립하므로 전기기계적진동의 고유치 이외의 고유치들에 의한 영향을 고려하면 식 (9)와 같이 쓸수 있다.

$$W(s) = \frac{1}{2H} \left[\frac{s}{(s+\alpha)^2 + \beta^2} + \frac{A(s)}{B(s)} \right] \cdot T_x(s) \quad (9)$$

식 (9)의 괄호안에 있는 첫번째 항은 회전자진동에 관련된 고유치가 속도에 미치는 영향을 나타내며, 두번째항은 기타의 고유치들의 영향을 나타낸다.

식 (6)을 유도할때와 같이 외부토크트르크가 주파수 Ω의 정현파이고 속도를 기준패이스로 하면 다음과 같이 유도할수 있다.

$$W_r = \frac{1}{2H} \left[\frac{jn}{(\alpha + jn)^2 + \beta^2} + \frac{A(j)}{B(j)} \right] [T_{xr} + jT_{xi}] \quad (10)$$

식 (10)을 정리하면

$$(\alpha + jn)^2 + \beta^2 = \frac{1}{2HW_r} \left[\frac{jn + \frac{(\alpha + jn)^2 + \beta^2}{B(jn)} A(jn)}{[T_{xr} + jT_{xi}]} \right] \quad (11)$$

식 (11)의 첫번째 괄호내의 두번째항이 첫번째 항인 jn에 비하여 대단히 작고 가 작다고 가정하면, 식 (8)으로서 α와 β를 추정할수 있다.

만약 계통계수가 정 또는 부의 방향으로 큰 값을 가지게 될때는 식 (9)의 S를 -σ + jΩ로 대체하여 정상상태의 응답을 구할수 있다. 이때 식 (11)에 대하는 수식은 식 (12)와 같다.

$$(\alpha - \sigma + j\Omega)^2 + \beta^2 = \frac{1}{2HWr} \left[\frac{(-\sigma + j\Omega) + [(\alpha - \sigma + j\Omega)^2 + \beta^2]A(-\sigma + j\Omega)}{B(-\sigma + j\Omega)} \right] * [Txr + jTxi] \quad (12)$$

식 (12)의 첫번째 괄호내의 두번째항의 크기를 줄이는 방향으로 σ 와 Ω 를 조절할수 있다. 만약 두번째항의 크기를 영으로 조절할수 있다면 식 (12)는 다음과 같다.

$$(\alpha - \sigma + j\Omega)^2 + \beta^2 = \frac{1}{2HWr} (-\sigma + j\Omega) (Txr + jTxi) \quad (13)$$

식 (13)을 정리하면

$$\alpha = \sigma + \frac{\Omega Txr - \sigma Txi}{4nWr}$$

$$\beta^2 = \Omega^2 - \frac{\Omega Txi + \sigma Txr}{2HWr} \left[\frac{\Omega Txr - \sigma Txi}{4nWr} \right]^2 \quad (14)$$

이 경우에 반복계산을 위한 초기치는 $\sigma = 0$ 및 Ω 는 공진주파수에 가깝게 조절하고 반복계산하여 α 와 β 의 값을 구할수 있다. [2], [3]

IV. AESOPS프로그램의 개요

EPRI 보고서 [1]에 보고된 AESOPS 프로그램은 2,000 Bus, 3,600 lines, 발전기 250대 및 6개의 DC송전선으로 구성되는 전력계통의 전기기계적진동모드를 계산할수 있다. 그리고 1개의 프로그램과 36개의 서브루틴으로 구성되어 있는 방대한 프로그램이다. 그림 2에 본 프로그램의 계층구조도를 보았다. [3]

그림 2. AESOPS 프로그램의 계층구조도

```

MAIN ==> FACE ==> PAGET
                ==> LRFHST ==> PAGET
                ==> LFTNP ==> PAGET
                    ==> BUSCHG ==> PAGET
                    ==> CHECK ==> CHECK
                ==> DYNINT ==> CRDXXX
                    ==> CHECK
                    ==> DCINP ==> CRDXXX
                        ==> DCINL
                        ==> PAGET
                        ==> MATINV
                        ==> FORMR ==> MOVLEV
                    ==> SYNINT ==> CRDXXX
                        ==> PAGET
                        ==> MCHCK
                        ==> READIN ==> CRDXXX
                        ==> RGIN
                        ==> FORMR ==> MOVLEV
                    ==> PRINT1 ==> PAGET
                        ==> MOVLEV
                ==> LFTAB ==> BQLOAD
                    ==> ORDER
                    ==> REDUCE
                    ==> BLIM
                    ==> SETUP
                ==> SOLVE ==> MERGE ==> PAGET
                    ==> FILCAD ==> MOVLEV
                        ==> DCRID ==> DCZJ
                        ==> ZOV
                        ==> ZEX
                        ==> PSSTAB
                    ==> SOLVER
                    ==> CPRNTX ==> PAGET
                    ==> PAGET
                    ==> SPDPLT ==> PAGET
    
```

V. 실제 전력계통의 적용

I절 서론에 언급한 바와 같이 우리나라에서도 1986년 10월 저주파진동현상을 경험한 바 있다. 이당시의 전력조류계산기록, 송전선정수, 발전기정수 및 제어계통정수를 근거로하여 양수발전소 기동시의 진동모드를 계산한 것을 표1에 요약하였다. 다만 본 결과는 저주파진동해석용프로그램의 계산 결과를 예시한 것으로 타당성 여부에 대해서는 좀더 많은 case study를 통하여 타당성을 입증하여야 한다고 생각한다.

본 연구에서는 고려대학교 전자계산소에 있는 IBM4341 기종에 맞도록 원래의 프로그램을 수정하여 EPRI최종보고서에 예시되어 있는 New England Test System에 대한 결과는 거의 정확하게 일치하였다. 원래 Cyber 기종 컴퓨터의 Word Length와 IBM컴퓨터 기종의 Word Length가 차이가 있으므로 거의 무시할수있을 정도의 차이는 있었다.

표1. 실제 전력계통의 전기기계적 진동의 고유치 ('양수 발전소 기동'의 경우)

Mode	고유치	진동주파수	영향이 큰발전기
1	0.1446+j2.4777	0.394Hz	1001,1002,1025,1031, 1041,1042,1051,1052, 1061,1062,1063,1064, 1071,1072,1091,1092, 1101,1102,1105,1106, 1111,1112,1121,1122, 1151,1152,1161,1162, 1171,1172,1181,1201, 1205,1251,1301,1302, 1311,1321,1322,1325, 1326,1331,1355,1356, 1361,1362
2	-0.0342+j4.9010	0.780Hz	1001,1002,1025,1031, 1041,1042,1051,1052, 1061,1062,1063,1064, 1071,1072,1091,1092, 1101,1102,1105,1106, 1111,1112,1121,1122, 1151,1152,1161,1162, 1171,1172,1181,1201, 1205,1301,1302,1311, 1321,1322,1331,1355, 1356,1361,1362
3	0.5312+j5.7401	0.914Hz	1251,1322,1361,1362
4	-0.0868+j5.7927	0.922Hz	1061,1062,1063,1064, 1071,1072,1105,1106, 1121,1122
5	-0.1021+j7.0704	1.125Hz	1121,1122
6	-0.1025+j7.0793	1.127Hz	1105,1106
7	-0.2976+j7.1478	1.138Hz	1061,1062,1063,1064, 1105,1106,1151,1152, 1161,1162,1181,1201, 1205,1301,1302,1355, 1356
8	-0.0626+j7.6126	1.212Hz	1361,1362
9	-0.4953+j7.6201	1.213Hz	1325,1326
10	-0.0774+j8.5207	1.356Hz	1161,1162
11	-0.4796+j8.5196	1.356Hz	1001,1002,1025,1151, 1152
12	-0.5396+j8.7139	1.387Hz	1355,1356

13	-0.4734+j8.8443	1.408Hz	1101,1102,1111,1112
14	-0.1295+j9.1125	1.450Hz	1052,1071,1072,
15	-0.1121+j9.1873	1.462Hz	1071,1072,
16	-0.5777+j9.2883	1.478Hz	1181
17	-0.1345+j9.3572	1.489Hz	1051,1052,
18	-0.5687+j9.5067	1.513Hz	1181,1201
19	-0.6090+j9.7366	1.550Hz	1151,1152
20	-0.5629+j9.7467	1.551Hz	1101,1102,1111,1112
21	-0.8273+j9.8683	1.571Hz	1001,1002
22	-0.8121+j9.8945	1.575Hz	1001,1002,1025
23	-0.1467+j10.0607	1.601Hz	1091,1092
24	-0.6119+j10.8319	1.724Hz	1031
25	-0.7670+j11.3621	1.808Hz	1311
26	-0.4394+j11.5702	1.841Hz	1041,1042
27	-0.4362+j11.7088	1.864Hz	1041,1042
28	-0.8242+j15.9325	2.536Hz	1171,1172

- * 단, 속도조절계통 및 전력계통안정기의 영향 무시.
- * 속도 변분치가 0.3 P.U. 이상인 발전기만 예시함.
- * PSS/E 프로그램의 여자계통모델과 AESOPS프로그램의 여자계통모델간에는 약간의 mismatch가 있음.

표1에 나타난 바와 같이 28개의 진동 모드중에서 모드1과 모드3이 불안정한 것으로 판명되었다. 모드1의 진동주파수는 0.394Hz이며 구동발전기는 1321호기였으며 전발전기가 영향을 받는 것으로 판명되었다. 모드3의 진동주파수는 0.914Hz이며 구동발전기는 1251호기였으며 1322호기 및 1361,1362호기에는 큰 영향이 있으나 여타발전기에 대해서는 별 영향이 없는 것으로 판명되었다. 진동모드2 (0.78Hz)는 1986년 10월 당시 기록된 저주파진동기록 0.78Hz와 일치하였다.[5]

VI. 결과 검토

본 논문에서는 시간영역해석에 근거한 과도안정도해석과 보완관계에 있는 주파수영역해석에 근거한 AESOP 프로그램으로, 1986년 10월에 경험한 바 있는 저주파 진동현상을 해석하였다. 전기기계적진동에 관련된 28개의 진동모드를 확인한 바 있으며 정상적인 경우의 진동모드를 계산하기 위한 작업을 진행 중이다. 앞으로 여자계통(Excitation System)의 영향, 속도조절계통(Speed Governing System)의 영향 및 전력계통안정기(Power System Stabilizer) 등의 영향에 대한 연구에 필수적인 도구로서 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

VII. 참고 문헌

1. R.T.Byerly, D.E.Sherman, and R.J.Bennon, "Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations", Part 1, 2, and 3, EL-726, Research Project 744-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1978.
2. R.T.Byerly, R.J.Bennon, and D.E.Sherman, "Eigenvalue Analysis of synchronizing Power Flow Oscillations in Large Electric Power Systems", IEEE PAS-101, No.1, pp.235-243, January 1982.
3. R.T.Byerly, D.E.Sherman, and B.J.Bennon, "Phase II : Frequency Domain Analysis of Low Frequency Oscillations in Large Electric Power System", vol.1, 2, 3, 4, 5, Research Project 744-1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, April, 1982.
4. Y.Y.Hsu, S.W.Shyue, and C.C.Su, "Low Frequency oscillations in Longitudinal Power Systems : Experience with Dynamic Stability of Taiwan Power System", IEEE PWR Vol.2, No.1, pp 92-100, February, 1987.
5. 한국전력공사 발전저, "계통동요현상분석", 한국전력공사 보고서, 1987. 5.