

제주 HVDC 연계 시스템의 주파수 제어에 관한 연구

(A Study on the Frequency Control for Cheju HVDC Linked System)

박종광* · 최중기 · 진성은 · 김찬기 · 한병성 · 김경철

(Jong-Kwang Park · Jong-Kee Choi · Seong-Eun Jin · Chan-Ki Kim · Byung-Sung Han · Kyung-Chul Kim)

요 약

제주-해남 HVDC 시스템은 300[MW]까지 전력을 공급한다. 용량이 큰 HVDC 시스템은 전력계통의 동요를 댄핑 하는데 적합하다. 본 논문은 해남과 제주도를 연결하는 HVDC 시스템의 주파수 제어를 다루었다. 제주도의 주파수 제어는 제주도 전력계통의 시스템 주파수를 일정하게 유지하는데 있다. PST 프로그램으로 제주 전력계통을 축소 등가화 시키고, HVDC 시스템은 상세 모델링하여 성능 평가를 하였다. 적정 댄핑 계수를 유지하도록 HVDC 주파수 제어기의 파라미터를 선정하였고, 3상 단락 사고시 제주 계통의 과도 동요현상은 시뮬레이션 결과 충분한 댄핑으로 안정되게 제어됨을 확인하였다.

Abstract

Cheju-Haenam HVDC link transmits electrical power up to 300[MW]. Because of its size, HVDC system has a great potential for damping power system oscillations. This paper deals with the frequency control of the KEPCO HVDC system linking Haenam to Cheju island. Frequency control at Cheju island ensures that the island AC system frequency is maintained. Performance are evaluated using a reduced Cheju network and a detailed model of the HVDC system modelled in the PST software. Transient oscillations for the 3 phase fault carried out with HVDC frequency control are well damped as the control parameters have been adjusted.

Key Words : HVDC, Frequency control, PST, Transient oscillations, Damping

1. 서 론

제주-해남 HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템은 제주지역에 부족한 전력을 육지로부터 공급 받기 위해서 영국의 GEC Alsthom사에서 1997년

완공하여 운전되고 있다. 기본 사양은 최대 용량 300[MW], DC 180[kV]이다. 현재 제주 부하의 60%까지 담당할 수 있다.

제주-해남 HVDC 시스템은 제주지역에서 인버터 동작을 하며 주 제어기로는 정전류 제어를 한다. 보조 제어기로 주파수 제어와 정전력 제어가 있다. 주파수 제어기는 HVDC 시스템이 주파수 모드로 설정한 경우에 제주 계통의 주파수 제어를 담당하게 된다.

* 주저자 : 한전 전력연구원 차세대전력기술그룹
Tel : 042-865-5873, Fax : 042-865-5844

E-mail : 01101005@kepcoco.kr
접수일자 : 2005년 1월 17일
1차심사 : 2005년 1월 19일
심사완료 : 2005년 2월 4일

본 논문은 제주 HVDC 주파수 제어를 다루고자 한다. 제주도의 주파수 제어는 제주도 전력계통의 시스템 주파수를 일정하게 유지하는데 있다.

사례연구 시스템은 육지와 제주를 HVDC로 연결하고, 육지와 제주의 AC 시스템을 축소 등가 모델링하고, HVDC 시스템은 상세 모델링 하여 주파수 제어 성능을 평가하고자 한다. 제주지역의 HVDC 주파수 제어 효과를 검증하기 위해, 제주지역 모선에 3상 단락 사고가 발생했을 때의 과도 응답 특성을 분석하였다.

2. 제주-해남 HVDC 연계 시스템 모델링

그림 1은 HVDC 연계 시스템으로서 전력은 해남(모선 5)에서 제주(모선 15)로 공급한다.

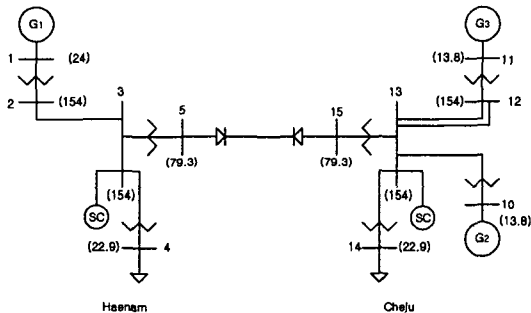


그림 1. 제주-해남 HVDC 연계 시스템
Fig. 1. Cheju-Haenam HVDC linked system

그림 1에서 숫자는 모선 번호를 나타내고, 모선 전압은 '()'로 표시하고 단위는 [kV]이다. 편의상 해남 지역의 모선 번호는 자리 수를 하나로 표시하고, 제주 지역은 두 자리 수로 하였다.

본 논문에서는 Power System Toolbox[1]을 이용하여 조류 계산, 소신호 안정도, 과도 안정도를 시뮬레이션하고 제주 지역의 주파수 제어 특성을 분석하였다.

사례 연구에 사용된 발전기는 초과과 발전기 모델[2]이고, 여자기는 간단한 정지형 모델[2,3], 그리고 터빈-조속기 시스템도 간략화 시킨 모델[2,3]을 사용했다.

PSS/E[4]를 이용하여 계산한 해남 AC 계통의 단락비는 $14.2 \angle -82[^\circ]$ [pu]이고, 제주 AC 계통의 단락비는 $6.3 \angle -76.5[^\circ]$ [pu]이었다. 송전 선로의 선로 정수는 단락비를 근거로 등가화 시켰다.

해남 지역의 발전기는 1대(G_1)로 등가화 했고, 제주 지역은 HVDC가 연계된 제주 화력(제주 T/P #1,2,3 과 G/T #1,2,3)을 발전기 1대(G_2)로 등가화 시키고, 한림 화력(G/T #1,2 와 S/T #1)과 남제주 화력(T/P #1,2 와 D/P #1,2,3,4)을 발전기 1대(G_3)로 등가 모델링 하였다.

모선 3과 모선 13에는 HVDC 시스템에 무효전력을 공급하는 조상 설비(Synchronous Condenser)가 설치되어 있다.

사고 모의를 위해 모선 13과 모선 12 사이의 송전 선로는 2회선으로 구성했다. 해남 지역의 부하의 의미가 없으므로 0[MVA]로 하고, 제주 지역은 실측한 자료를 토대로 모선 14에 $414.7+j177.3$ [MVA]의 부하가 있다.

제주 지역의 발전량은 실측한 자료에 따르면 HVDC를 통해 $149.3+j95.4$ [MVA]만큼 유입되고, 제주 화력, 한림 화력, 남제주 화력 발전을 포함하면 $415.8+j202.8$ [MVA]으로 기록되었다.

HVDC 시스템은 제주 지역에 부족한 전력을 육지로부터 공급받기 위해서 운용되고 있다. HVDC 모델은 참고문헌[1,2]에서 제시한 것이고, 적용 데이터는 참고문헌[5,6]을 근거로 하였다.

표 1은 HVDC 선로 데이터이고, 표 2는 HVDC 변환기(정류기와 인버터)데이터이다.

표 1. HVDC 선로 데이터
Table 1. HVDC line data

| column | variable | unit |
|--------|---|-----------|
| 1 | Rectifier Number | |
| 2 | Inverter Number | |
| 3 | dc line resistance | 2.5[ohms] |
| 4 | dc line inductance | 9.6[mH] |
| 5 | dc line capacitance | 0.0[μF] |
| 5 | Rectifier smoothing inductance | 60.0[mH] |
| 6 | Inverter smoothing inductance | 60.0[mH] |
| 7 | dc line power rating | 150[MW] |
| 8 | current margin for inverter current control | 20.0[%] |

표 2. HVDC 변환기 데이터
Table 2. HVDC converter data

| column | variable | unit |
|--------|---|---------------------|
| 1 | HVDC converter Number | |
| 2 | LT bus number from bus data | |
| 3 | Converter Type 1-rectifier 2-inverter | |
| 4 | Rated dc voltage | 180.0[kV] |
| 5 | Commutating Reactance(Xc) | 8.0 Ohms per bridge |
| 6 | Number of bridges in series | 2 |
| 7 | Rectifier- α min, Inverter- γ min | 2 degrees |
| 8 | Rectifier- α max, Inverter- γ max | 162 degrees |

그림 2는 정류기 제어 모델이고, 그림 3은 인버터 제어 모델이다.

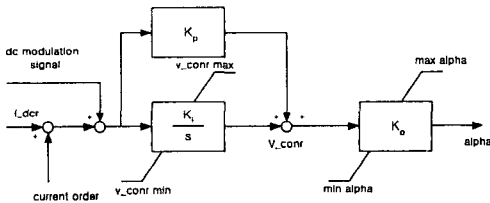


그림 2. 정류기 제어 모델
Fig. 2. Rectifier pole control model

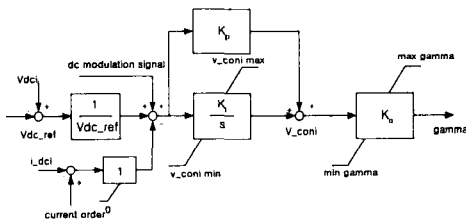


그림 3. 인버터 제어 모델
Fig. 3. Inverter pole control model

3. 제주 HVDC 연계 시스템의 주파수 제어

제주 HVDC 시스템은 용량이 제주지역 발전용량에 비해 상대적으로 크므로 제주 계통의 주파수 제어에 활용된다.

그림 4는 HVDC 시스템의 주요 제어기 블록도이다[7]. Master 제어기로부터 제어 모드와 전력 전송 방향을 입력받고, Phase 제어기로 제어 신호를 보내

주는 역할을 한다.

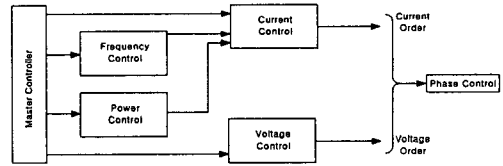


그림 4. HVDC 시스템의 제어기
Fig. 4. HVDC system pole controller

전류 제어기는 HVDC 시스템의 전류 지령 값을 발생시키는 부분으로서 제주의 경우는 주 제어기로 동작된다.

주파수 제어기는 HVDC 시스템이 주파수 모드로 설정할 경우에 제주 계통의 주파수 제어를 담당하는 부분으로서 발전기의 터빈 제어기에 해당된다. 터빈 제어는 조속기에 의해 이루어진다.

그림 5는 간략화시킨 HVDC 주파수 제어의 전달 함수 블록도이다[5, 6].

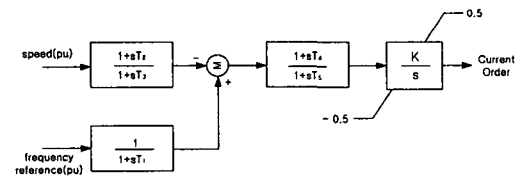


그림 5. HVDC 주파수 제어 블록도
Fig. 5. HVDC frequency control block diagram

그림 5에서 speed(pu) 신호는 동기 조상기(제주 화력 발전소의 Gas-Turbine Generator #1,2,3)에서 검출한다.

4. HVDC 주파수 제어기의 적정 파라미터 선정기법

그림 5에서 HVDC 주파수 제어기의 시정수 및 이득 계수는 극좌표 이동법을 이용한 일종의 시행착오법인 Pattern Search법[8]을 이용한다. 그림 6과 같이 Pattern Search 법은 시정수 및 이득 계수를 변화 시키면서 제주 계통의 동요 현상을 나타내는 계수인 댐핑이 적정한지를 판단하여 시뮬레이션을 받

복하여 구한다.

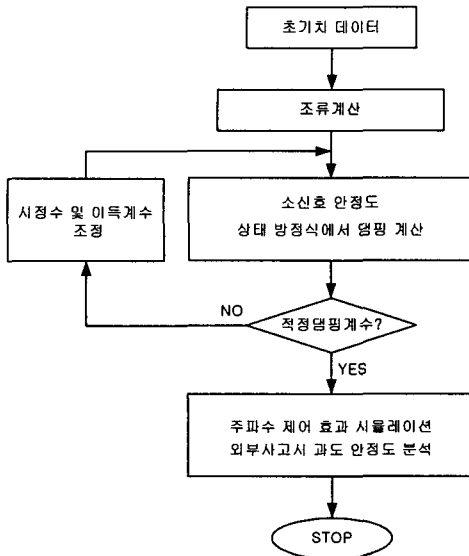


그림 6. PSM 순서도
Fig. 6. Flow chart of Pattern search method

5. 사례연구

그림 1의 사례 연구 시스템에서 AC 계통의 데이터는 참고문헌[5]을 근거로 하고, HVDC 시스템 데이터는 참고문헌[2,5,6]을 근거로 한 것이다. 시스템 기준은 100[MVA], 154[kV]이다.

조류계산 결과는 표 3, 4, 5에 간추려 놓았다.

표 3. 계산된 모선데이터
Table 3. Solved bus data

| BUS | Volts [pu] | Angle [deg] | Generator | | Load | |
|-----|------------|-------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | | | Real [pu] | Reactive [pu] | Real [pu] | Reactive [pu] |
| 1 | 1.0300 | 0 | 1.5429 | 0.2275 | 0 | 0 |
| 2 | 1.0298 | -0.0833 | 0 | 0 | -0.0000 | -0.0000 |
| 3 | 1.0000 | -5.9137 | 0.0000 | 0.7123 | 0 | 0 |
| 4 | 1.0000 | -5.9137 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.9991 | -6.0008 | 0 | 0 | 1.5201 | 0.9163 |
| 10 | 1.0000 | 0 | 1.6796 | 0.0014 | 0 | 0 |
| 11 | 1.0300 | 8.9072 | 1.0010 | 0.0304 | 0 | 0 |
| 12 | 1.0300 | 8.8531 | 0 | 0 | -0.0000 | 0.0000 |
| 13 | 1.0000 | -0.0962 | 0.0000 | 2.6234 | 0 | 0 |
| 14 | 0.9982 | -0.3343 | 0 | 0 | 4.1470 | 1.7730 |
| 15 | 0.9338 | 0.0024 | 0 | 0 | -1.5029 | 0.7025 |

표 4. 계산된 선로 전력
Table 4. Solved line flows

| Line | From bus | To bus | Power | |
|------|----------|--------|----------|--------------|
| | | | Real[pu] | Reactive[pu] |
| 1 | 1 | 2 | 1.5429 | 0.2275 |
| 2 | 2 | 3 | 1.5429 | 0.2252 |
| 3 | 3 | 4 | 0 | 0 |
| 4 | 3 | 5 | 1.5201 | 0.9195 |
| 5 | 10 | 13 | 1.6796 | 0.0014 |
| 6 | 11 | 12 | 1.0010 | 0.0304 |
| 7 | 12 | 13 | 1.0010 | 0.0295 |
| 8 | 13 | 14 | 4.1470 | 1.7934 |
| 9 | 13 | 15 | -1.5029 | 0.7057 |
| 1 | 2 | 1 | -1.5429 | -0.2252 |
| 2 | 3 | 2 | -1.5201 | -0.2071 |
| 3 | 4 | 3 | 0 | 0 |
| 4 | 5 | 3 | -1.5201 | -0.9163 |
| 5 | 13 | 10 | -1.6796 | 0.0014 |
| 6 | 12 | 11 | -1.0010 | -0.0295 |
| 7 | 13 | 12 | -0.9645 | 0.1229 |
| 8 | 14 | 13 | -4.1470 | -1.7730 |
| 9 | 15 | 13 | 1.5029 | -0.7025 |

표 5. 계산된 변환기 데이터
Table 5. Solved rectifier data

| Rectifier | Inverter |
|------------------------------|-------------------|
| alpha in[degrees] | gamma in[degrees] |
| 30.5097 | 23.5 |
| dc voltage in[kV] | dc voltage in[kV] |
| 183.268 | 181.194 |
| Power in[MW] | Power in[MW] |
| 152.011 | 150.291 |
| line current in [kA] 0.82944 | |

조류 계산 결과와 사례 연구 시스템의 모델로 소신호 변화에 의한 상태 방정식을 세우고, 상태 방정식으로부터 고유치, 중요 주파수, 댐핑 계수를 구한다.

표 6은 그 결과를 나타낸다. 사례연구 시스템에는 6개의 중요 모드가 있다.

표 6. 고유 중요 모드
Table 6. Natural oscillation modes

| Eigenvalues | Frequency[Hz] | Damping ratio |
|-----------------|---------------|---------------|
| -0.11 ± 0.09 i | 0.01 | 0.75 |
| -0.16 ± 0.46 i | 0.07 | 0.34 |
| -0.86 ± 7.09 i | 1.13 | 0.12 |
| -5.03 ± 13.42 i | 2.14 | 0.35 |
| -6.31 ± 14.18 i | 2.26 | 0.41 |
| -2.35 ± 23.59 i | 3.75 | 0.1 |

Pattern Search 법으로 구한 HVDC 주파수 제어기의 적정 파라미터는 아래와 같다. 단, 기준 주파수 입력 시정수는 $T_1 = 0.01s$, 속도 측정 시정수는 $T_2 = 0s$, $T_3 = 0.02s$ 으로 하였다.

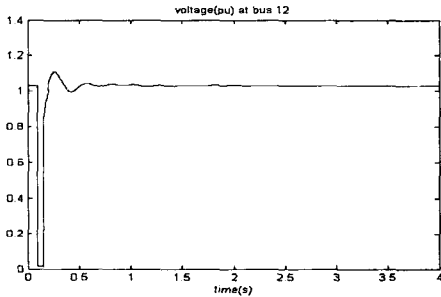
$$T_4 = 0.08s, T_5 = 0.02s, K = 10.0$$

사례 연구 시스템에 HVDC 주파수 제어기를 적용한 후, 소신호 변화에 의한 상태 방정식을 세우고, 상태 방정식으로부터 고유치, 동요 주파수, 댐핑 계수를 구하여 표 7에 간추려 놓았다. 표 6과 비교하여 보면, 제주 계통에 HVDC 주파수 제어를 하면 훨씬

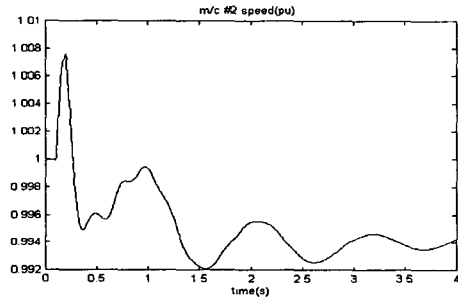
개선된 댐핑을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

표 7. HVDC 주파수 제어시 고유 동요 모드
Table 7. Natural oscillation modes with HVDC frequency control

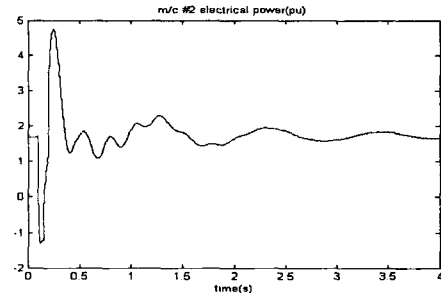
| Eigenvalues | Frequency[Hz] | Damping ratio |
|---------------------|---------------|---------------|
| $-0.11 \pm 0.09 i$ | 0.01 | 0.75 |
| $-2.10 \pm 0.78 i$ | 0.12 | 0.94 |
| $-2.20 \pm 4.70 i$ | 0.75 | 0.42 |
| $-5.03 \pm 13.42 i$ | 2.14 | 0.35 |
| $-5.50 \pm 15.64 i$ | 2.49 | 0.33 |
| $-6.02 \pm 11.95 i$ | 1.9 | 0.98 |



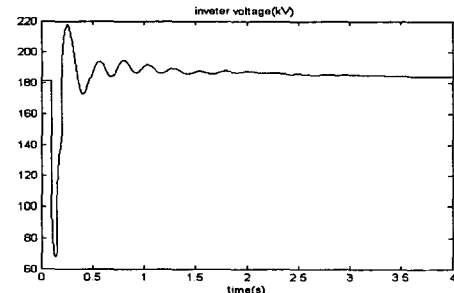
(a) 사고 모션 12의 전압((pu))



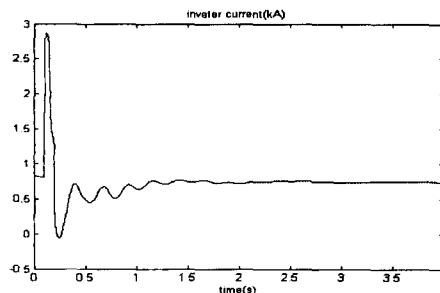
(b) 제주 화력(G₂)의 속도((pu))



(c) 제주 화력(G₂)의 유효 전력((pu))



(d) HVDC 인버터 전압((kV))



(e) HVDC 인버터 전류((kA))

그림 7. 모션 12에 3상 단락 사고시 과도 응답
Fig. 7. Transient responses for 3 phase fault at bus 12

제주 HVDC 연계 시스템의 주파수 제어에 관한 연구

HVDC 주파수 제어기의 효과를 파악하기 위하여, 제주 지역 모선 12의 근접한 곳에 3상 단락 사고를 모의 하여 과도 안정도를 분석 하였다. 3상 단락 사고시 0.05초 후에는 모선 12와 모선 13사이의 2회선 송전 선로 중 1회선이 차단되는 것으로 모의했다. 시뮬레이션 시간은 4.0초이다.

그림 7은 HVDC 주파수 제어기 설치전의 과도 현상을 나타내는 파형이다. (a)는 사고 모선 12의 전압, (b)는 제주 화력(G_2)의 속도, (c)는 제주 화력(G_2)의 유효 전력, (d)는 HVDC 인버터 전압, (e)는 HVDC

인버터 전류를 보여준다.

그림 8은 HVDC 주파수 제어기가 동작 했을 때, 모선 12에 3상 단락 사고시 제주 지역의 과도 현상을 나타내는 파형이다. HVDC 주파수 제어기 설치 전 (그림 7 참조)과 비교하여 보면 파형에 동요 현상이 많이 감소되었음을 알 수 있다. HVDC 주파수 제어기를 사용하면 제주 지역의 주파수는 보다 안정적으로 제어되는 것을 간접적으로 검증하는 자료가 될 수가 있다.

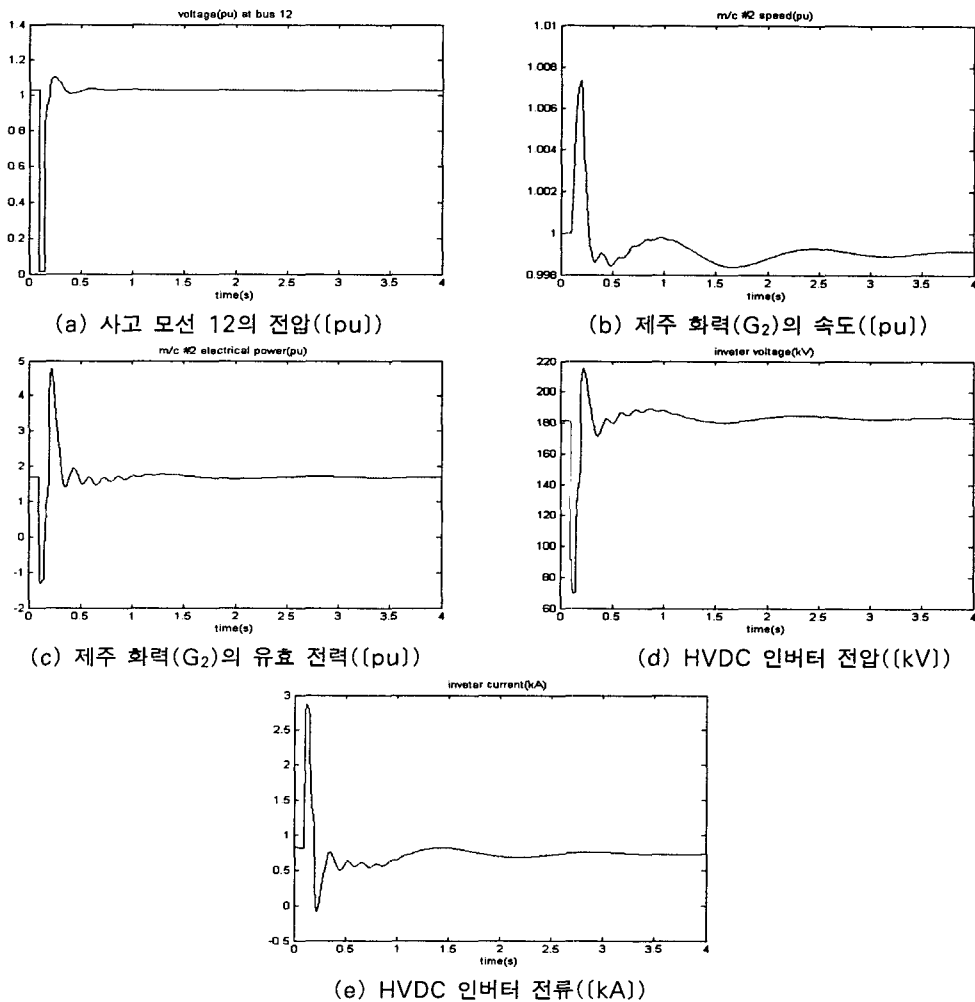


그림 8. HVDC 주파수 제어기 동작시 과도 응답
Fig. 8. Transient responses with HVDC frequency control

6. 결 론

제주-해남 HVDC 시스템은 제주 지역에 부족한 전력을 육지로부터 공급하기 위해 설치 운용되고 있다. 제주 지역의 주파수 제어는 HVDC 주파수 제어기를 이용하여 안정적으로 제어된다.

본 논문에서는 HVDC 주파수 제어기를 모델링 하여 적정 파라미터를 구하고 제주 HVDC 시스템과 AC 계통의 과도 특성을 분석하였다.

HVDC 주파수 제어기를 설치 전에는 소신호 안정도 분석 결과 낮은 댐핑 계수(0.34, 0.12, 0.35, 0.41, 0.1)로 3상 단락 사고시 제주 지역에 저주파수 동요 현상이 발생하였다. 적정 댐핑 계수를 갖도록 HVDC 주파수 제어기의 파라미터를 설정한 후 3상 단락 사고시 제주 지역의 저주파수 동요 현상이 많이 개선되는 것을 소신호 안정도 분석 결과 비교적 높은 댐핑 계수(0.94, 0.42, 0.35, 0.33, 0.98)로 개선되었고, 사고 모션 전압, 터빈 속도, 유효 전력, 인버터 전압, 인버터 전류 등의 파형에서 HVDC 주파수 제어 효과를 확인할 수 있었다.

References

- [1] Program manual, "Power System Toolbox", Cherry Tree Scientific Software, 2004.
- [2] Graham Rogers. "Power System Oscillations", Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.
- [4] PSS/E Program Operation Manual, Power Technologies Inc, Nov. 2001.
- [5] "교적 연계 계통의 안정 운용을 위한 협조제어 및 보호 기술 향상연구", 최종보고서, 한전 전력연구원, 2002.5.
- [6] 김찬기, "제주-해남 HVDC 과도 특성 분석", 대한 전기학회지, 2000.9.
- [7] Haenam-Cheju HVDC Link Operation and Maintenance Manual, CEC Alstom, 1993.
- [8] J. A. Cadeow and H. R. Martens, "Discrete-time and Computer Control System", Prentice-Hall Inc., 1970.

◇ 저자소개 ◇

박종광 (朴鍾廣)

1971년 12월 2일생. 1997년 호원대학교 전자공학과 졸업. 1999년 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동대학원 전기공학과 박사과정(수료). 2001년 한국전력공사 입사. 2005년 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 일반연구원.

최종기 (崔鍾基)

1969년 2월 1일생. 1992년 동국대학교 전기공학과 졸업. 1995년 홍익대학교 전기기체어공학과 석사. 1995년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

진성은 (陳聖恩)

1980년 1월 8일생. 2005년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 2005년~현재 홍익대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

김찬기 (金燦起)

1968년 12월 17일생. 1991년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 중앙대학교 전기공학과 졸업(박사). 2005년 현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원.

한병성 (韓秉誠)

1951년 12월 22일생. 1988년 프랑스 루이파스퇴르대학 박사학위취득. 1988년 프랑스 CNRS(프랑스국립과학연구소) 연구원. 2005년 현재 전북대학교 전자정보공학부 교수.

김경철 (金慶哲)

1954년 1월 20일생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업. 1977~1982년 국방과학연구소 연구원. 1982~1984년 NMSU 전기공학과 석사. 1984~1988년 UTA 전기공학과 박사. 1988~1991년 한국전기연구소 선임연구원. 1991년~현재 홍익대학교 전기공학과 교수.