

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

• 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건 을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer 🖃





공학전문석사 학위 연구보고서

發電機共用母線 電壓의 統合制御에 關む 研究

A Study the Coordinated Voltage Control at the Generator Common Bus

2018년 2월

서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 홍 성 옥

發電機共用母線 電壓의 統合制御에 關む 研究

A Study the Coordinated Voltage Control at the Generator Common Bus

지도교수 정 현 교

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위 연구보고서로 제출함 2018년 2월

> 서울대학교 공학전문대학원 응용공학과 응용공학전공 홍 성 옥

홍성옥의 공학전문석사 연구보고서를 인준함 2018년 2월

위	원 장	윈	용 태	(인)
위	원	정	현 교	(인)
위	원	진	영 규	(인)

國文抄錄

本 論文은 여러 대의 발전기가 각각의 승압용변압기(승압기)를 통해 발전기공용모선에 연결되어 전력을 송전하는 발전소의 경우에 공용모선에 대한 전압 및 무효전력 제어를 위한 AVR 통합제어 방법을 제안한 연구이다. 현재 국내에는 약 100개의 발전소에서 발전기공용모선을 운영하고 있으며 공용모선에 대한 전압제어는 다수의 발전소 운전원이 독립된 위치에서 각각의 AVR을 수동 제어하는 방식을 채택하고 있다.

本 論文에서는 발전기공용모선 전압 (V_H) 과 각 발전기의 단자전압 (V_{Gi}) 및 무효전력 (Q_{Gi}) 을 측정하여 소내모선 전압 (V_{Ai}) 제한 고려와 계통이 요구하는 공용모선 전압 (V_{Href}) 을 제어하는 알고리즘(QVCC)을 제시하였다. 事例 硏究에서는 하동화력 $5\sim8$ 호기의 구성방식과 데이터를 이용하여 본논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 입증하였다. Matlab. Simulink 환경에서 시뮬레이션 모델을 구축하고, 제시한 알고리즘 적용 전·후 공용모선전압과 발전기전압 추이를 비교·분석하였다. 제안된 방법을 이용하여 발전기공용모선 전압 추이(profile) 개선과 발전기간 무효전력 순환 문제의 개선효과를 달성 할 수 있었다. 발전기공용모선 전압의 유지 및 관리는 계통안정성 확보와 발전소내의 전력계통에 대한 운전신뢰성 및 효율에 직접적인영향을 주는 매우 중요한 문제이다. 따라서 현재 사용하고 있는 수동제어방식보다 제시한 방안을 심층 연구하여 적용할 시점이라 사료된다.

주요용어: 기력발전소, 소내 전력계통, 발전기공용모선, AVR.

目 次

國文抄錄	i
目 次	ii
그림目次	iii
表 目次	iv
記號說明	V
第 1 章 序 論	1
1.1 研究目的	1
1.2 論文構成	3
第 2 章 發電機共用母線 電壓制御 事例	4
2.1 海外事例	4
2.2 國內事例	16
第 3 章 發電機共用母線의 Q-V 數式	22
3.1 電力潮流 一般式	22
3.2 共用母線의 Q-V 數式	27
4.3 共用母線 電壓의 統合制御	38
第 4 章 事例研究	42
4.1 模擬系統	42
4.2 結果分析	45
第5章結論	48
參考文獻	50
附 錄	
Abstract	56

그림目次

- 그림 2.1 병렬운전의 무효전력 제어도
- 그림 2.2 그림 2.1의 수정역률(MPF) 제어도
- 그림 2.3 2기 계통의 발전기공용모선 전압조정 흐름도
- 그림 2.4 다수발전기 연결 공용모선의 단선도
- 그림 2.5 공용모선 전압 제어도
- 그림 2.6 단자전압과 모선전압의 변화 추이도
- 그림 2.7 발전기단자전압-무효출력 변화 추이도
- 그림 3.1 4기 2회선 계통 구성도
- 그림 3.2 4기 2회선 계통 임피던스도
- 그림 3.3 AVR 스텝시험 1기 무한 계통도
- 그림 3.4 무효전력-전압 통합협조제어(QVCC)도
- 그림 3.5 발전기공용모선 전압의 통합제어 알고리즘 흐름도
- 그림 3.6 QVCC 제어 블록다이어그램
- 그림 4.1 QVCC 적용 전 전압변화 추이도(4기 응동)
- 그림 4.2 QVCC 적용 후 전압변화 추이도(3기 응동)
- 그림 4.3 QVCC 적용 후 전압변화 추이도(4기 응동)
- 그림 4.4 QVCC 적용 후 전압변화 추이도(1기 응동)

表 目次

- 표 2.1 발전기 단자전압 및 소내 모선전압 운전범위
- 표 2.2 여자기 및 AVR 운전범위와 제어량
- 표 2.3 500MW급 발전기 무효전력 공급한계
- 표 3.1 4기 2회선 계통 임피던스 값
- 표 4.1 모의계통의 주요기기 규격 및 정수 값
- 표 4.2 모의계통의 발전기 출력 값

記號 說明

_ F : 수정 역률(Modified Power Factor)

 \overline{F}_i : i 발전기 Q_i 의 감소 평활함수

 V_r : AVR 전압 기준값

 θ_{ij} : i-j 모선간 위상차 각

 G_{ij}, B_{ij} : i-j 선로의 콘덕턴스와 서셉턴스

 T_{imax}, T_{imin} : i 변압기 탭 상한 값과 하한 값

 $V_{l_{max}}, V_{l_{min}}$: i번째 부하모선의 전압 상한과 하한 값

 V_{Gi} : i번째 발전기 단자전압

 V_{Ai} : i번째 소내모선 전압

 V_{H} : 발전기공용모선 전압

 ΔV : 모선전압 편차

 ΔQ : 모선 무효전력 편차

X:1기 무한계통에서의 등가 리액턴스

 ΔV_{H} : 발전기공용모선 전압편차

 V_{Href} : 발전기공용모선 전압 기준 값

 V_{HGiref} : i번째 발전기의 단자전압 기준 값

 V_{Aimin} : i번째 소내모선 전압 최소 값

 V_{Aimax} : i번째 소내모선 전압 최대 값

 ΔQ_{HGi} : i번째 발전기의 무효전력 편차

 $\Delta Q_{\!H}$: 발전기공용모선 무효전력 편차

 H_{km} , L_{km} : 자코비 행렬의 대각행렬

 $P_{Gi},\;Q_{Gi}$: i번째 발전기의 유효출력, 무효출력

 P_{Lj} , Q_{Lj} : j번째 송전선로의 유효전력, 무효전력

第1章序 論

1.1 研究目的

발전기공용모선은 다 수의 발전기가 각각의 승압용변압기(승압기)를 통해 모선에 연결되어 송전하는 경우로 이 모선을 발전기공용 모선이라 정의하고 있다. 해외는 물론 국내의 대부분 발전소는 규모의 경제성을 이유로 2대 이상 다수 발전기를 하나의 부지에 설치운영하고 있다. 이 경우 해당부지에서 생산된 전력은 발전기공용모선에 접속되어 2개 이상의 송전선로를 통해 상대변전소로 송전된다.

발전기공용모선은 위치상 발전기 단자에 근접되어 전력조류계산에서 발전모선(PV 모선)으로 취급하고 있으나 실제 발전기 운전에서는 PV 모선처럼 제어 할 수 없는 특징을 가지고 있다. 실제와유사한 운전결과를 얻기 위해서는 전력조류에서 부하모선(중간모선)으로 다루어야 한다. 발전기공용모선의 전압은 연결된 모든 발전기의 전압조정 행위에 직접적으로 영향을 받으며 정상적 운전 상태에서 중부하시 모선의 전압은 하락하고 경부하시는 전압이 상승한다.모선전압이 운전범위를 크게 벗어나면 계통 안정도 저해는 물론 부하설비의 성능유지와 기기의 수명 등에 나쁜 영향을 줄 수 있다.현재, 발전모선(PV모선)의 전압은 발전기별 설치된 자동전압조정장치(AVR)에 의해 자동으로 조정되고 있으나, 발전기공용모선 전압은

전력거래소(KPX)에서 전력계통의 상황을 고려하여 급전지시를 통해 발전회사에 요청하는 경우 발전소 운전원이 수동 조정하는 방식으로 유지 및 관리되고 있다. 이 경우 발전소 운전원은 각각 독립된위치에서 소내 전력계통 전압을 고려하여 해당 발전기의 AVR을 수동으로 조정하여 발전기공용모선 전압을 제어하고 있다. 위 와 같은수동제어 방식은 송·수전단에서의 무효전력 수급 불일치로 인한 계통안정도 저해는 물론 공용모선 전압이 규정범위를 벗어나는 사례(주로 초과)가 발생하여 전압 안정도 저해 요인이 되고 있다. 또한송·수전단 무효전력장치 효율성 저해와 발전기간(發電機間) 무효 순환전류(무효횡류)가 발생하여 전기자 권선 저항손실을 초래하여 전력소비 증가 요인이 되고 있다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위해 발전기공용모선에서의 무효 전력 및 전압 변화량에 대응하여 공용모선에 연결된 발전기의 AVR 을 통합 제어하는 알고리즘(QVCC)을 제시하고자 한다. 이는 기존 발전소에서 사용하는 AVR 기능에 상위적인 개념의 AVR 통합제어 방법이다.

사례연구에서는 하동화력5~8호기 계통을 모의해석 모델로 구성하고, Matlab. Simulink 환경에서 제안방법의 효과를 분석하고 제안알고리즘인 QVCC의 타당성을 입증하였다.

1.2 論文構成

본 논문에서는 여러 대의 발전기가 하나의 발전기 공용모선에 접속되어 송전하는 발전소에서의 발전기공용모선 전압 및 무효전력에 대한 통합제어 방법을 제안하였다. 발전기 공용모선 전압제어에 대한 국내외 적용사례, 무효전력-전압관계식 유도 및 알고리즘 제안과 사례연구를 통한 타당성입증으로 다음과 같이 구성하였다.

- 1) 국내 및 해외에서 사용 중인 발전기공용모선에서의 무효전력 및 전압에 대한 제어 사례를 조사, 분석하였다.
- 2) 발전기공용모선의 무효전력-전압관계에 대한 일반수식을 유도하였으며, 발전기공용모선 전압 제어를 위한 Q-V 제어계통 및 AVR 통합제어 알고리 즘(QVCC)을 제안하였다.
- 3) 사례연구에서는 Matlab Simulink 환경에서 4기 2회선 계통에 제안 알고 리즘을 적용하여 실행 적용 전·후를 비교분석함으로서 QVCC의 타당성과 효용성을 입증하였다.

상기 연구내용을 5장으로 나누어 기술하였다. 제 2장에서는 국내외 적용사례 분석내용을, 제 3장에서는 공용모선 전압제어 관계식과 통합제어 알고리즘의 제안 내용을 기슬 하였으며, 제 4장은 제안 알고리즘의 적용사례와 타당성 입증 내용을 기술하였다. 제 5장에서는 본 논문에서 연구한 내용을 종합 정리하였다.

第 2 章 發電機共用母線 電壓制御 事例

2.1 海外事例

국가마다 전국적인 전압을 제어하고 협조하는 개념은 대동소이하나, 운전 전략은 상이하다. 1차적인 전압제어는 발전기가 지역적 제어를 담당하고 있으나 광역적인 전압제어는 범용 시스템이 정립되어 있지 않아 아직 적용단계에는 이르지 못하고 있다.

프랑스 서부지역의 경우 1차(발전기 전압제어, 수초이내), 2차(특별지점 대상 발전기 무효전력제어, 수분이내), 3차(전국적 전압지도 최적화, 약15분소요)전압제어인 3단계 계층제어(three-tier control) 개념을 적용하고 있다[1]. Manitoba Hydro발전소의 경우 고압 측 전압제어를 위해 무효전력협조제어(JVC: Joint Var Control) 개념을 도입하여 발전소의 전체 여자기를 공동 제어하여 발전모선의 전압을 관리하고 있다[2]. 이탈리아 전력계통의경우 3계층 통합 전압제어 시스템(CHS: Consolidated Hierarchical System)을 도입하여 전압품질, 안정도 및 운전 효율을 개선하였으며, 특히지역전압운영자(RVR: Regional Voltage Regulator)는 발전소 내 발전기간뿐만 아니라 발전소간의 불필요한 무효전력 수수를 규제하는 수급 불일치방지 시스템을 운영 중이다[3].

한편, Feng Dong씨 등은 발전소에서 보유한 무효전력량의 정도가 전압 안정도와 직결되어 있다는 관점에서 최적조류계산(OPF: Optimal Power Flow) 기법에 기초한 최적 무효전력 관리체계를 구축하고 이를 적용하여, 각 발전소에서는 전압-무효전력 곡선(V-Q Curve)법에 기초한 참여요소를 정하는 방법을 제시하였다[4]. Selam Awadallah씨 외 일동은 현재 기력발 전소의 개별 발전기에 대한 무효전력 유지는 수동으로 제어되고 있으나, 무 효전력 제어루프들이 전압제어 계통의 내측루프로만으로 구성되면, 이는 고 압 측 전압제어회로가 불충분 하게 된다. 이를 해결하기 위해 기력발전소 의 고압 측 전압제어용 Q-V 제어에 대한 수학적 모델을 제시하였다[5] Iasna Dragosavac씨 일동은 공용모선의 전압과 무효전력을 제어하기 위해 개별 발전기에 부과할 무효전력 수요(demand Q)할당량의 결정에 감도행렬 접근법(approximate sensitivity matrix method)을 사용하여 수학적 모델과 무효전력·전압 협조제어 알고리즘을 제시하였다[6]. Mauro Cimino 씨 일 동은 한 발전소 내 여러 대의 발전기를 접속하여 송전하는 경우 발전기별 무효전력을 제어하여 순환전류, 저 역률운전 및 한계 값 근접 운전 등의 문 제를 극복하기 위해 수정된 역률 및 제어 알고리즘을 제시하였다. 이를 위 해 추가적인 하드웨어 없이 기존 분산제어시스템(DCS:Distributed Control System) 상에서 시행이 가능 하도록 하고 있다[7].

상기에 언급한 바와 같이 해외에서는 공용모선 전압에 대한 자동제어 시스템을 도입하고 있고, 무효전력 부가서비스와 전력거래 제도 시행에 대비하고 있다. 상기에서 언급한 7개 사례에 대한 상세한 내용은 아래와 같다.

2.1.1 프랑스 EDF 사례

국가마다 전압을 통합 협조 제어하는 개념(전략)은 상이하다. 1차적 전압제어는 발전기가 지역적 제어를 담당하고 있으나 광역적 전압제어는 국가적으로 범용화 되지 않았다. 2000년도 서 프랑스지역에서 수년간 성공적으로 적용된 새로운 2차 전압제어(SVC :Secondary Voltage Control) 개념이 도입되었다. 적용 당시 프랑스 송전계통의 전압제어 개념은 3단계 계층제어(three-tier control system) 방식으로 1차적으로(수초이내) 발전기 단자전압 제어, 2차적으로(수분이내)는 지역별 특별지점(Pilot point)대상 발전기 무효전력 자동조정(SVC)을 시행하고 3차적(약15분 이내)으로는 전국적인 전압 최적화와 특별지점에서의 경제성과 안정도 제고에 필요한 전압제어 하였다. 프랑스 서부지역에서 2년간의 시험운영을 통해 통합 2차 전압제어(CSVC :Coordinated Secondary Voltage Control)가 주는 여러 이점을 입증하였다. 특히 사고 시 SVC보다 더 빠르고 안정적으로 반응했으며 무효전력 예비 량이 증가되고 있음을 보여 주었다[1].

2.1.2 Manitoba 수력발전소 사례

2000년도 Manitoba Hydro발전소에서의 고압 측 전압제어 고압측(HV: High Voltage)에 대한 2가지 형태의 방식을 제시하였다.

- 여자기를 통한 명시적 전압 제어 및 발전기단자로부터 부분적 보상법
- · 여자기를 통한 발전소 내 전체 발전기간 무효전력협조제어(JVC)하는 개념을 도입하였다. Manitoba Hydro 발전소는 다음과 같은 다양한 방식의 고압측 전압제어를 시도하였다.
- (1) 임피던스보상(impedance compensation) : 고압 측 전압제어에 보다 직접적으로 영향을 줄 수 있는 승압 변압기 측 한 지점을 기준 전압제어 하는 방식이다. 발전기 단자전압에 부과하여 제어지점을 통과하는 임피던스에

비례하여 연동하는 고정자전류를 통한 간접적 전압측정으로 전압을 제어하는 방식이다

(2) 발전기 직접제어(Gen Direct High Side Control): 임피던스보상의 대안으로 복잡한 변압기 배열시 적용하였다. 여자기가 직접적으로 HV 측 전압을 제어하는 방식이다. 다수의 발전기가 공용모선을 제어하기 때문에 동요가 발생될 수 있다. 이를 피하기 위해 HV 측 모선전압이 기계의 Q에 대해 늘어지며 정확도가 떨어지는 현상이 발생하였다.

(3) 무효전력 협조제어(JVC) : 초기에는 HVDC 인버터측의 동기조상기(9대)를 HV 전압제어에 적용하였다. 이후 발전기에도 확대 적용하였다.

Manitoba Hydro JVC에 대한 설계시 고려사항과 특징을 제시하였다. JVC 설계는 다양한 여자기 및 설비구성과 상호 인터페이스 할 수 있는 제어기를 표준화하였다. Grand Rapids 발전소에서의 시운전을 통한 온라인 실증시험으로 IVC 반응 효과를 입증하였다[2].

2.1.3 이탈리아의 송전계통(Italian transmission grid)사례

2004년도 이탈리아의 송전계통(transmission grid)에서 적용된 계층적 전압제어 방식이 전압품질, 안정도 및 운전효율을 개선한 바, 이를 위해 적 용된 3계층(REPORT/RVR/NVR)에 대한 일반적 특성과 기존 설비에 대한 간섭 등에 대해 기술하였다.

· REPORT: the Voltage and Reactive Power Regulator

· RVR: the Regional Voltage Regulator

· NVR: the National Voltage Regulator

지역전압운영자(RVR)는 발전소 내 발전기간의 불필요한 무효전력의 불일 치와 발전소간 무효전력 불일치를 방지하는데 효과적이었으며, 제어 지역 내의 무효전력 자원을 효과적으로 활용할 수 있음을 입증하였다. 또한 이탈리아 전력계통의 실시간 무효전력 제어의 실효성을 입증하였으며, 2004년까지 완공되는 이탈리아 전력계통의 계층적 전압제어는 각 지역에 대한 방대한 진단적 정보를 제공하고 있다. 이러한 정보는 발전소제어감시와 지역급전소(SCADA: Supervisory Control & Data Acquisition)간의 통합 활용이 가능하게 하는 기회를 제공하였다[3].

2.1.4 무효전력관리 프로그램(RRMP) 사례

발전소에서 보유한 무효전력량의 정도가 전압안정도와 직결되어 있다. 따라서 이런 관점에서 OPF에 기초한 최적의 무효전력 보유관리방안을 제시하였다. 이를 위해 각 발전소에서 V-Q 곡선법에 기초한 참여요소를 정하는 방법을 제시하고 있다.

본 논문은 한계 무효전력 관리(critical reactive power management)를 위해 OPF에 기초한 무효전력관리 프로그램(RRMP: Reactive Power Reserve Management)을 제시하였으며, 이를 위한 다목적 함수가 소개되었다. 또한 전압안정도에 취약한 지역에 설치된 발전기에 대해서는 최대 무효전력 여유를 유지하기 위한 가중치를 부여하였다. RRMP 실행 및 적용의 첫째 목적은 정상 운전조건에서 전압안정도여유도(Voltage Stability Margin)를 높이기 위해 무효전력 보유량을 최대화하기 위함이다. 두번째 목적은 여러 운전제약조건 하에서 손실을 최소화하기 위함이다.

·RRMP 쌍대(dual) 목적함수 : F(U) = $\min\{p_1Q_{\max res} + p_2P_{loss}\}$

• 전압안정도제약 : $Q_k^C \geq Q^N + \beta S_t S^{margin}$

여기서 $Q_{
m max}_{res}$: 최적화된 계통의 무효전력의 합

 P_{loss} : 송전손실, $p_1 < 0, p_2 > 0$

 Q_k^C : k_{th} 에 대한 무효전력(부하)

 Q^N : 정상조건에서 무효전력(부하)

β : 부하증분 방향

 S_{t} : 정상상태에서 총 무효전력(부하)

 S^{margin} : 명시된 무효전력 여유분

위 식의 최적화에 필요한 제약조건(constraints)는 다음과 같다.

$$\cdot$$
 등호제약조건 : P_i = $V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} {\cos} \theta_{ij} + B_{ij} {\sin} \theta_{ij})$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$
 $i \in N$

$$\cdot$$
부등호제약조건 : $T_{i \min} < T_i < T_{i max} \qquad i \! \in \! N_T$

$$V_{gimin} < \ V_{gi} < \ V_{gimax} \quad i \negthinspace \in \negthinspace N_{G}$$

$$Q_{Cimin} < Q_{Ci} < Q_{cimax}$$
 $i \in N_c$

$$V_{li\min} < V_{li} < V_{limax}$$
 $l \in N_L$

$$Q_{aimin} < Q_{ai} < Q_{aimax} \quad i \in N_G$$

또한 상기의 RRPM에 지역별 전압제어를 위한 가중치 (w_g) 요소를 고려하여 설계하였다.

$$m{\cdot} \; w_g = rac{S_t S^{margin}}{Q_i^{margin}} \;$$
을 말한다.

여기서 Q_i^{margin} : 해당지역의 무효전력 여유분을 의미한다. 본 논문에서 제시된 방법은 정적 및 동적 전압안정도에 효과적임을 입증하였다[4].

2.1.5 무효전력 제어를 위한 수학적 모델 제시

현재 기력발전소의 개별 발전기에 대한 무효전력 유지는 수동으로 제어되고 있다. 무효전력 제어루프들이 전압제어 계통의 내측루프로 구성 될때는 고압 측 전압제어에 미치는 영향이 불충분하다. 따라서 본 논문은 기력발전소의 고압 측 전압제어를 위한 Q-V 제어 수학적 모델을 제시하였다. Matlab Simulink 환경에서 6개 발전기를 가진 기력발전소에 대해 동기발전기, 터빈과 조속기(TBN & Governors), 여자기와 자동전압조정기(Exciter & AVRs), 변압기, 계통구성에 대한 각각의 요소를 모델링하였다.

본 논문은 기력발전소에서의 개별 발전기별 무효전력 제어의 단점을 보완하기 위해 사례연구(case study)를 통해 CQVC의 필요성 및 적용효과를 입증하였다. 이를 적용함으로써 수동운전 시 무효전력동요(reactive power hunting) 문제와 특정 발전기의 무효전력 출력한계 도달 시 기대하지 않은 비정상적인 무효전력 반응 문제를 해결하였다[5].

2.1.5 무효전력-전압 협조제어기(CQVC) 사례

여러 대의 발전기가 접속된 접속점 전압의 수동전압제어의 주요 단점은 계통 동요와 무관하며 계통의 실제상황과 상이한 오프라인(offline)발전계획에 의존해야 한다는 점이다. 서로 다른 기술적 경제적 기준에 따른 수동에 의한 최적 무효전력 급전은 달성하기 어렵다. 따라서 발전기간(發電機間)의 무효전력 내부순환 제거 효과와 발전기의 무효전력 가용성은 비상시유용하며 계통안정도 향상에 중요한 요소이다.

- 전압변화추이 확보를 통한 전압품질 향상 도움
- · 유효출력 전송능력 향상
- 전압불안정 및 붕괴가능성 감소
- 송전손실 감소

본 논문은 기력발전소를 위한 새로운 무효전력-전압 협조제어기(CQVC: Coordinated Reactive Power-Voltage Controller)개념을 제시하였으며, 새로운 제어기를 설계 적용함으로써 수동제어의 단점 극복과 계층적 전압제어의 한 부분으로 동기발전기간 단자전압의 제어루프와 중복되는 무효전력제어루프의 증폭문제를 해결하였다.

개별 발전기에 대한 무효전력 수요(demand Q)할당량의 결정에 감도행렬접근법(approximate sensitivity matrix method)을 사용함으로써, 본 접근법의 주요 쟁점(issue)인 계통의 등가리액턴스를 어떻게 신속, 정확하게 추정하느냐는 문제가 접속점에서의 Q/V 변화율 관찰과 이러한 비율의 적절한평균화에 의해 해결하였다[6].

2.1.7 다수발전기의 병렬운전 시 무효전력제어 사례

단일 발전소 내에 여러 대의 동기발전기가 1개의 송전선로를 통해 송전되는 경우 개별발전기 제어를 통한 무효전력 제어는 순환전류 발생, 저역률 운전 및 발전기 한계 값 운전과 같은 문제를 초래할 수 있다.

따라서 상기의 문제점을 해결하기 위해 새로운 수정 역률(MPF: Modified Power Factor)법을 제시하였다.

먼저 역률(pf) 특성을 살펴보면 아래와 같은 성질을 갖고 있다.

- · S : 항상 0 보다 큰 값으로 평활함수(smooth function)
- · S ≥ P, 0≤F≤1 (단 P≥0)

Budeanu에 의한 역률 식은 다음과 같다.

$$F = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$
 (2.1)

발전기의 유효출력(P)은 특성상 항상 양수인 반면에 무효출력(Q)은 발전기 단자전압에 따라 양 또는 음수 등 여러 가지 값으로 변화한다. 따라서 이와 같은 특성을 반영한 새로운 역률 식은 식(2.2)와 같다.

$$\hat{F} = \operatorname{sign}\{Q\} \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$
 (2.2)

여기서 sign 함수는 크기가 0보다 크거나 최대 1이다, 그렇지 않으면 0의 값을 가진다. 수학적으로 표현하면 $\lim_{Q \to 0^+} \hat{F} = 1 \neq \lim_{Q \to 0^-} \hat{F} = -1$ 을 의미한다.

위와 같은 불연속 문제에 대한 선형적 제어기 설계를 위해 \hat{F} 신호를 사용하며, 진상 및 지상역률 제어기를 만들기 위해 아래의 식을 제안하였다.

$$\overline{F} \doteq F \operatorname{sign}\{Q\} + (1 - \operatorname{sign}\{Q\})$$
 (2.3)

 $\stackrel{-}{F}$: 수정 역률(MPF)

식(2.3)은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- $\overline{F} \in [0, 2]$, 반면에 $F \in [0, 1]$ 범위의 값을 갖는다.
- $\cdot \ F : Q$ 의 단순 감소함수로 역률의 동적변화 시각화에 유리하다.
- F : Q의 평활함수로, 서로 다른 발전기 사이의 Q 분배와
 균형을 위한 제어기 개발에 주요한 요소이다.
- \cdot F : 전통적 의미의 전력품질을 평가하는 요소를 갖고 있다. \overline{F} 함수를 수식으로 표현하면 아래와 같다

$$\overline{F} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$
 , 단, Q ≥ 0 (2.4)

$$\overline{F} = \frac{2-P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \quad \text{단, Q < 0}$$
 (2.5)

또한, 식(2.4)와 식(2.5)에서 유효전력 P > 0 이고, 다음과 같이 증분 역률 식인 식(2.4a)와 식(2.5a)를 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial \overline{F}}{\partial Q} = PQ(P^2 + Q^2)^{-3/2} < 0$$
 , 단, $Q < 0$ (2.5-1)

발전소의 AVR에 의한 균형 있는 무효전력 자동분배에 필요한 제어알고리 즉 개발에는 무효전력량의 정량화와 전압 기준 값 (V_r) 에 대한 무효전력 출력 값 (Q_i) 을 제공하는 모델이 요구된다. 다른 발전기가 생산한 무효전력은 병렬로 연결된 발전기의 F 가 동등 할 때 균등하게 분배된다.

함수 $\overline{F_i}$ 는 변수 (Q_i) 에 따라 단순히 감소하는 평활함수로 제안된 제어기 개발에 아래의 식을 사용하였다.

$$F_i = \frac{P_i(t)}{\sqrt{P_i(t)^2 + Q_i(t)^2}}$$
 (2.6)

$$\overline{F_i}(t) = F_i sign Q_i(t) + (1 - sign Q_i(t))$$
 (2.7)

$$\overline{F_r}(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \overline{F_j}(t)$$
 (2.8)

$$u_i(t) = K(\overline{F_i}(t) - \overline{F_r}(t)) \tag{2.9}$$

여기서, n: 병렬연결 발전기 수

 u_i : i 발전기의 제어기 출력

K : 조정 가능 제어기 이득(gain)값

그림 2.1과 및 그림 2.2는 각 각 무효전력제어도와 MPF 제어도이다.

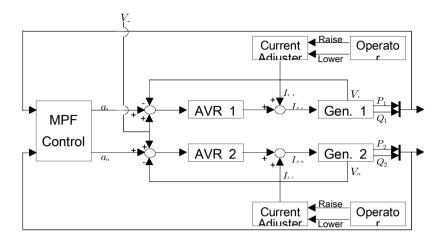


그림2.1 병렬운전의무효전력제어도

Fig. 2.1 Block diagram for reactive power control of parallel generators

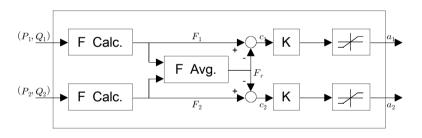


그림2.2 그림2.1의수정역률(MPF)제어도

Fig. 2.2 Modified Power Factor Block diagram of Fig. 2.1

본 논문에서 제시한 새로운 감시제어알고리즘(supervisory control algorithm)을 적용한 결과, 다음과 같은 효과가 나타남을 입증하였다.

- ·NERC and IEEE AVR + PSS 표준 협조기능 만족과 상기 문제 해소
- ·추가 하드웨어 없이 기존 DCS 구조 하에서 기능 수행 가능 등

2.2 國內事例

2.2.1 발전기 공용모선 운영

2016년도 기준 국내에는 약 100여 개의 발전소에서 발전기 공용모선을 설치하여 운영하고 있다. 운영전압별로 보면, 765kV 계통 3개소, 345kV 계통 43개소와 154kV 계통은 66여 개소이다.

이는 국내 대부분의 원자력, 화력 및 수력발전소에서 공용모선을 운영하고 있음을 의미한다. 발전소별 발전기 설치 대수와 배치 구성에따라 2기~16기가 발전기공용모선에 접속되어 2개~6개 송전선로를통해 송전하는 시스템이다(부록 1 참조).

전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지 기준(산업부 고시 제2015-112호)에 따른 발전기 공용모선에 대한 전압관리는 "동일모선에 다수의 발전기가 연결어 있는 경우 해당 모선에 가장 근접한 점에서 조정하도록 각 발전기의 자동 전압조정장치의 기준점이 보상되어야 한다."라고 규정하고 있다. 또한 발전기 공용모선의 전압 유지범위에 대한 구체적인 범위는 규정하지 않았으며 345kV 계통의 경우 ±5%의 유지범위를 목표로 하고 있다.

발전기공용모선의 전압관리는 전력거래소와 발전회사가 역할을 나누어수행하고 있다. 전력거래소의 급전지시에 따라 발전회사 운전원이 발전기단자전압을 조정하는 형식으로 수행하고 있다. 국내에서 운영되는 대부분의 발전기공용모선 전압 조정은 연결된 발전기에 대한 단자전압을 동시에 수동 조절하는 방식으로 수행된다.

발전기 단자전압은 소내 모선계통 전압 유지를 위해 필요시 발전소 운전원의 판단에 의해 조절되기 때문에 전력거래소의 급전지시와 무관에게 공용모선 전압에 영향을 주고 있다. 발전기 공용모선 전압조정 순서는 그림 2.3과 같다.

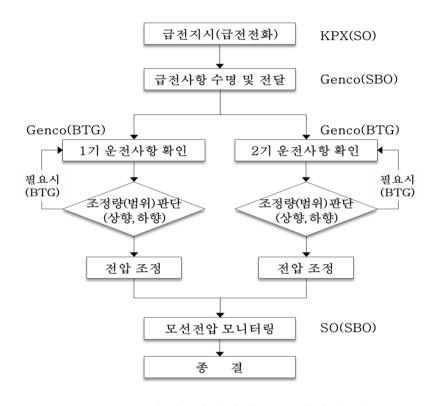


그림 2.3 2기 계통의 발전기공용모선 전압조정 흐름도 Fig. 2.3 Flowchart for 2 generators common bus voltage adjustment

2.2.2 500MW 4기 공용모선 사례

그림 2.4는 국내에서 운영 중인 가장 전형적인 발전기 공용모선 사례로 500MW 4기 2회선 송전선로의 공용모선에 대한 계통도이다. 송전전압은

345kV이고 소내 모선전압은 6.9kV(MV :Medium Voltage)이다.

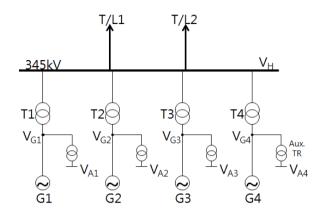


그림 2.4 다수발전기 연결 공용모선의 단선도

Fig. 24 One line diagram of common bus for multi-generators connected in parallel 그림 2.5는 현재의 4기 2회선 발전기 공용모선 전압제어 계통도를 나타낸 것이다. 4명의 운전원이 각각의 발전기 단자전압을 수동방식으로 조정하고 있다.

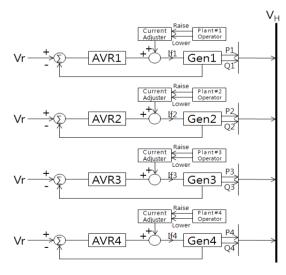


그림2.5 공용모선 전압 제어도

Fig. 2.5 Diagram of voltage control for generator common bus

그림 2.6은 4개 발전기에 대한 30일 동안 발전기 단자전압(SG5, SG6, SG7, SG8) 및 공용모선 전압(V_H)변화 추이를 나타낸 그림이다. 각각의 발전기전압조정 행위가 계통전압에 따라 협조제어가 이루어 지지 않아 발전기간에 상반된 대응을 하고 있으며 또한 공용모선 전압은 0.02[pu] 범위에서 상시적으로 변화하는 추이를 나타내고 있다.

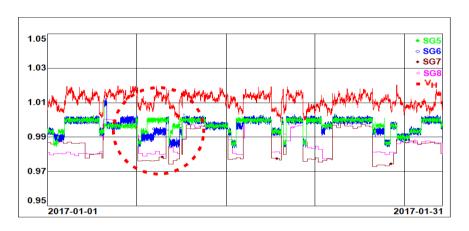


그림2.6 단자전압과모선전압의 변화추이도

Fig. 2.6 Profile of generator terminal voltage and common bus voltage

그림 2.7은 30일간 발전기(1기)의 유효출력-무효출력-단자전압을 관찰한 것으로 발전모선전압-무효전력 관계를 나타내고 있다. 노량색선(yellow line)인 발전기 단자전압(terminal voltage)에 따라 녹색선인 무효전력(reactive power)이 변화고 있음을 나타낸다.

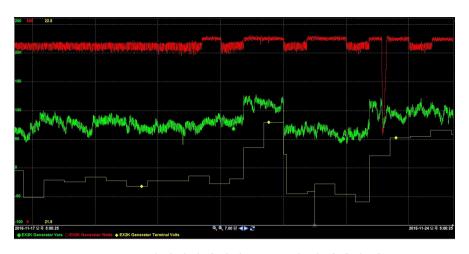


그림2.7 발전기단자전압 — 무효출력변화 추이도

Fig. 2.7 Profile of generator terminal voltage - reactive power output

발전기공용모선 전압 조정 행위는 일률적 조정이 어려우며 또한 발전소의 기동 또는 정지 중에 소내 계통모선 전압불안을 가중시킬수 있다. 표 2.1은 500MW 8개 호기의 발전기 단자전압 운전범위및 소내 모선전압 유지 범위에 대한 예시 이다.

표 2.1 발전기 단자전압 및 소내 모선전압 운전범위

Table 2.1 Operating range of generator terminal voltage and house medium voltage bus

호기	발전기 단자전압[kV]		소내 모선전압[kV]		
	최소	최대	최소	최대	
1~2	21.6	22.4	6.6	7.0	
3~4	21.7	22.0	6.6	6.8	
5~6	21.7	22.3	6.7	6.9	
7~8	21.5	22.0	6.8	7.0	

발전기별 최대 및 최소 무효출력 범위는 과 여자한계(OEL: Over Excitation Limit)와 저 여자한계(UEL: Under Excitation Limit)설정 값에 제한을 받는다. 그러나 계통의 과도상태에서는 단시간 내에한해 설정 값보다 더 큰 값으로 운전할 수 있도록 설계하고 있다. 500MW 기력발전기의 여자기 및 AVR 운전범위 및 제어 량(예시)은 표2.2와 같다.

표2.2 여자기 및 AVR 운전범위와 제어 량 Table 2.2 Operating and control value of exciter & AVR

구 분	설 정 값		
	V/Hz Limit	110%	
	Off-line OEL Trip pick up	120% AFNL	
OEL 설정값	On-line OEL Trip pick up	102% AFFL	
	On-line OEL Trip	112% AFNL	
		(120 sec)	
	0 MW	-177 MVAr	
	161 MW	-201 MVAr	
UEL 설정값	322 MW	-200 MVAr	
	483 MW	-174 MVAr	
	604 MW	-135 MVAr	

OEL: Over Excitation Limit
UEL: Under Excitation Limit
AFNL: Ampere Field No Load
AFFL: Ampere Field Full Load

표 2.3은 유효출력 500MW에서 발전기 단자전압(Vt)과 무효출력(Q) 의 최대, 최소 운전한계(예시) 이다.

표2.3 500MW급 발전기 무효전력 공급한계

Table 2.3 Reactive power capability of 500MW class generator

구 분	단자전압	무효출력	계자전압	계자전류	제한요소
丁 七	Vt(kV)	Q(Mvar)	$E_{fd}(V)$	$I_{fd}(A)$	
최대	22.74	9.49	207	3083	무효출력
무효전력	(103%)	243	397	3003	240Mvar
최소	21.10	-14.4	288	2402	단자전압
무효전력	(95%)	⁻ 14.4	200	2 4 02	(95%)

第3章 發電機共用母線의 Q-V 數式

3.1 潮流計算 一般式

3.1.1 유효전력과 무효전력 관계식

뉴톤-랩슨(Newton-Raphson)법에 의한 복소수함수 표현에 의한 전력조류 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{S}_{k} = P_{k} + jQ_{k} = \dot{V}_{k}\dot{I}_{k}^{*} \tag{3.1}$$

$$\vec{I_k} = \sum_{m=1}^{n} \dot{Y_{km}} \dot{V_m}$$
 (3.2)

$$P_k + jQ_k = \dot{V}_k \sum_{m=1}^{n} (G_{km} - jB_{km}) \dot{V}_m^*$$
 (3.3)

단,
$$k=1.2.$$
 $\cdots n$ 이코, $\dot{Y_{km}}=G_{km}+jB_{km}$ 이다.

식(3.3)으로부터 어드미턴스행렬만을 직각좌표로 표현하고, 전압은 극 좌표로 두고 풀면, 전력조류 방정식은 식(3.4)와 같다.

$$\begin{split} P_k + jQ_k &= V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} - jB_{km}) \, V_m (\cos\theta_{km} + j\sin\theta_{km}) \\ &= V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos\theta_{km} + B_{km} \sin\theta_{km}) \\ &+ j V_k \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}) \\ & \qquad \qquad \ \ \, \forall i = 1, 2, \, \cdots, \, n \, \cite{delta}, \, \theta_{km} = \theta_k - \theta_m \, \cite{delta}. \end{split}$$

따라서, 식(3.1)과 식(3.4)로 부터 유효전력 (P_k) 과 무효전력 (Q_k) 은 식(3.5)와 식(3.6)과 같이 유도된다.

$$P_{k} = V_{k} \sum_{m=1}^{n} V_{m} (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km})$$
 (3.5)

$$Q_{k} = V_{k} \sum_{m=1}^{n} V_{m} (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$
 (3.6)

3.1.2 뉴톤-랩슨 선형감도 조류계산식 유도

식(3.5)와 식(3.6)은 모선전압(V)와 위상각(θ)에 대한 비선형 연립방정식이다. 뉴톤-랩슨(Newton-Raphson)법을 운전점(V_0 , θ_0) 에서 데일러 급수전개로 선형감도행렬(linear sensitivity matrix)을 유도하면 식(3.7)의 뉴톤-랩슨 전력조류계산식이 된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$
(3.7)

여기서,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ = \\ \begin{bmatrix} P_1^{SP} - P_1(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 \cdots V_n) \\ \vdots \\ P_n^{SP} - P_n(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 \cdots V_n) \\ Q_1^{SP} - Q_1(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 \cdots V_n) \\ \vdots \\ Q_n^{SP} - Q_n(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 \cdots V_n) \end{bmatrix}$$
 (3.7 – 1)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} \cdots \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n}, \frac{\partial P_1}{\partial V_1} \cdots \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} \cdots \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n}, \frac{\partial P_n}{\partial V_1} \cdots \frac{\partial P_n}{\partial \delta V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} \cdots \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n}, \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} \cdots \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} \cdots \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n}, \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} \cdots \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix}$$
(3.7-2)

$$\begin{split} P_1(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 & \cdots V_n) = P_1^{SP} \\ & \vdots \\ P_n(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 & \cdots V_n) = P_n^{SP} \\ Q_1(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 & \cdots V_n) = Q_1^{SP} \\ & \vdots \\ Q_n(\theta_1, \cdots \theta_n, V_1 & \cdots V_n) = Q_n^{SP} \end{split}$$

식(3.7-2)는 자코비 행렬(Jacobian matrix)이며, 모선 어드미턴스 값, 모선전압과 위상각 등 모든 계통 정보가 들어 있는 행렬로매 반복 계산과정에 수정된다. 식(3.7)에서 모든 모선은 발전(PV)모선, 부하(PQ)모선 및 기준(스윙)모선으로 구분 지정하여 각 모선의전압(V)값의 크기와 위상각(θ)을 구하게 된다. 자코비 행렬을 이용하여 θ, V변화에 대한 P, Q 변화 값을 구할 수 있으며 또한 무효보상장치 설치 후 전압 변동 값을 예측할 수 있다.

식(3.7)로부터 물리적 관계가 약한 P-V 및 $Q-\theta$ 관계를 이용하여, 분할 뉴톤-랩슨(Decoupled Newton-Raphson) 조류계산식을 유도할 수 있다. 유효전력은 위상각에, 무효전력은 전압에 관계가 깊다는 전력계통 특성을 이용하면 자코비 행렬의 비대각 행렬 요소인 $\frac{\partial P}{\partial V}$ 및 $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$ 를 무시 할 수 있다. 따라서, 식(3.7)은 다음의 2개식으로 분할된다.

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \Delta \theta = H \Delta \theta \tag{3.8}$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V = L \, \Delta V \tag{3.9}$$

여기서,
$$H=\frac{\partial P}{\partial \theta}$$
, $(n_g-1)\times(n_g-1)$ 행렬이며 n_g 는 발전모선수
$$L=\frac{\partial Q}{\partial V},\ n_d\times n_d$$
 행렬이며 n_d 는 부하모선수

H 행렬에서,

$$H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km})$$
, 단 $m \neq k$

$$H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -B_{kk} V_k^2 - Q_k \tag{3.10}$$

L 행렬에서,

$$L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k(G_{km} \sin\theta_{km} - B_{km} \cos\theta_{km}), 단 m \neq k$$

$$L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -B_{kk}V_k + Q_k/V_k \tag{3.11}$$

3.2 共用母線의 Q-V 數式

3.2.1 4기 2회선 공용모선의 Q-V 민감도식

대부분의 발전소에서 발전기와 변압기는 상 분리모선(IPB :Isolated Phase Bus)으로 연결되며 발전모선 전압의 기준점은 IPB 접속점이 된다.

4개 발전기와 2회선 송전선로로 구성된 발전기공용모선의 계통 구성도는 그림 3.1과 같다.

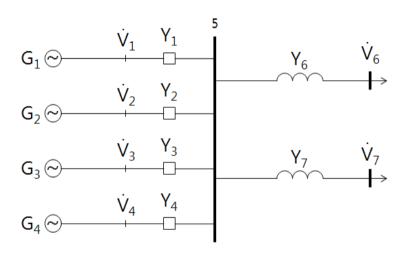


그림3.1 4기2회선 계통구성도

Fig. 3.1 Diagram for four generators and two transmission lines

그림 3.1은 4기 2회선 계통으로 발전모선 4개, 부하모선 2개, 발전기공용모선 1개로 구성되어 있으며, 임피던스 값은 표 3.1과 같다.

표 3.1 4기 2회선 계통 임피던스 값

Table 3.1 Impedance value of 4 generators and 2 transmission lines

번호	모선번호		임피던스 값		
	시작	끝	\dot{Z}	구분	
1	0	1	$\dot{Z_{G1}}$	동기 임피던스	
2	0	2	$\dot{Z_{G2}}$		
3	0	3	$\dot{Z_{G3}}$		
4	0	4	$\dot{Z_{G4}}$		
5	1	5	$\dot{Z_{T1}}$	Tr. 임피던스	
6	2	5	$egin{array}{c} \dot{Z_{G3}} \ \dot{Z_{G4}} \ \dot{Z_{T1}} \ \dot{Z_{T2}} \end{array}$		
7	3	5	$\dot{Z_{T3}}$		
8	4	5	$\dot{Z_{T4}}$		
9	5	6	$egin{array}{c} Z_{T3} \ Z_{T4} \ Z_{L1} \ Z_{L2} \end{array}$	선로 임피던스	
10	5	7	$\dot{Z_{L2}}$		

그림 3.1과 표 3.1로부터 Y_{BUS} 행렬을 구하면 다음과 같다.

 $\dot{Y}_1,\,\dot{Y}_2,\,\dot{Y}_3,\,\dot{Y}_4,\,\dot{Y}_5,\,\dot{Y}_6,\,\dot{Y}_7$ 값은 식(3.12)와 같다.

$$\begin{pmatrix}
\dot{Y}_{1} = \frac{1}{\dot{Z}_{G1} + \dot{Z}_{T1}} & \dot{Y}_{6} = \frac{1}{\dot{Z}_{L1}} \\
\dot{Y}_{2} = \frac{1}{\dot{Z}_{G2} + \dot{Z}_{T2}} & \dot{Y}_{7} = \frac{1}{\dot{Z}_{L2}} \\
\dot{Y}_{3} = \frac{1}{\dot{Z}_{G3} + \dot{Z}_{T3}} \\
\dot{Y}_{4} = \frac{1}{\dot{Z}_{G4} + \dot{Z}_{T4}}
\end{pmatrix}$$
(3.12)

4기 2회선 공용모선 계통에 대한 Y_{BUS} 행렬은 식(3.13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{Y}_{1} & 0 & 0 & 0 & -\dot{Y}_{1} & 0 & 0\\ 0 & \dot{Y}_{2} & 0 & 0 & -\dot{Y}_{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & \dot{Y}_{3} & 0 & -\dot{Y}_{3} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \dot{Y}_{4} & -\dot{Y}_{4} & 0 & 0\\ -\dot{Y}_{1} - \dot{Y}_{2} - \dot{Y}_{3} - \dot{Y}_{4} \sum_{n=1}^{7} \dot{Y}_{n} - \dot{Y}_{6} - \dot{Y}_{7}\\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{Y}_{6} & \dot{Y}_{6} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{Y}_{7} & 0 & \dot{Y}_{7} \end{bmatrix}$$
(3.13)

식(3.6)에서 유도한 무효전력식 Q_k 를 이용하여 5번 모선의 무효전력식 (Q_5) 을 구하면 식(3.14)가 된다.

$$\begin{split} Q_5 &= V_5 (G_{51} V_1 \sin\theta_{51} - B_{51} V_1 \cos\theta_{51}) \\ &+ V_5 (G_{52} V_2 \sin\theta_{52} - B_{52} V_2 \cos\theta_{52}) \\ &+ V_5 (G_{53} V_3 \sin\theta_{53} - B_{53} V_3 \cos\theta_{53}) \\ &+ V_5 (G_{54} V_4 \sin\theta_{54} - B_{54} V_4 \cos\theta_{54}) \\ &+ V_5 (G_{55} V_5 \sin\theta_{55} - B_{55} V_5 \cos\theta_{55}) \\ &+ V_5 (G_{56} V_6 \sin\theta_{56} - B_{56} V_6 \cos\theta_{56}) \\ &+ V_5 (G_{57} V_7 \sin\theta_{57} - B_{57} V_7 \cos\theta_{57}) \\ & (\theta_{55} = 0) \end{split}$$

식(3.14)에서 5번 모선의 Q-V 감도 행렬로부터 5번 모선에서의 민감도 식 $(\frac{\partial Q_5}{\partial V_5})$ 을 구하면 식(3.15)가 된다.

$$\begin{split} \frac{\partial Q_5}{\partial V_5} &= (G_{51}V_1\sin\theta_{51} + G_{52}V_2\sin\theta_{52} + G_{53}V_3\sin\theta_{53} + G_{54}V_4\sin\theta_{54} \\ &\quad + 2G_{55}V_5\sin\theta_{55} + G_{56}V_6\sin\theta_{56} + G_{57}V_7\sin\theta_{57}) \\ &\quad - (B_{51}V_1\cos\theta_{51} + B_{52}V_2\cos\theta_{52} + B_{53}V_3\cos\theta_{53} + B_{54}V_4\cos\theta_{54} \\ &\quad + 2B_{55}V_5\cos\theta_{55} + B_{56}V_6\cos\theta_{56} + B_{57}V_7\cos\theta_{57}) \end{split} \tag{3.15}$$

식(3.15)에서 발전모선과 발전기공용모선과는 거리는 1 km 이내로 매우 단거리에 위치하여 $\theta_{51} = \theta_{52} = \theta_{53} = \theta_{54} \simeq 0$ 으로 두어 계산해도 무방하다. 또한 전기기기는 저항 값이 리액턴스 값보다 적어 $G \ll B$ 로 콘덕턴스 값 G을 무시하면 서셉턴스 값인 B만으로 표현된 식(3.16)을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial Q_5}{\partial V_5} = -(B_{51}V_1 + B_{52}V_2 + B_{53}V_3 + B_{54}V_4 + B_{55}V_5)
-(B_{55}V_5\cos\theta_{55} + B_{56}V_6\cos\theta_{56} + B_{57}V_7\cos\theta_{57})$$
(3.16)

한편, 정상상태에서 발전기 단자전압은 1[pu]에 근접하여 운전되므로 $V_1=V_2=V_3=V_4=V_5\simeq 1$ 로 둘 수 있으며, 식(3.16)은 식(3.17)과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\frac{\partial Q_5}{\partial V_5} = -\left[\sum_{i=1}^5 B_{5i} + \sum_{k=5}^7 B_{5k} V_k \cos \theta_{5k}\right]$$
(3.17)

Q-V 감도행렬에서 5번 공용모선의 민감도식 $(rac{\partial Q_5}{\partial V_5})$ 은 전원단에서

바라본 등가 서셉턴스(리액턴스의 역수)의 합과 수전단의 모선의 전압 $(V_6,\ V_7)$ 과 위상각 $(\theta_6,\ \theta_7)$ 에 의해 영향을 받는다. 또한 발전모선전압과 수전단 모선전압의 위상차가 0 일 때(즉, $\theta_{56} = \theta_{57} \simeq 0)$ 5번 모선에서의 민감도식 $(\frac{\partial Q_5}{\partial V_5})$ 의 절대 값은 최대 값을 가지며, 이 값은계통 전체의 리액턴스의 역수 합(서셉턴스의합 $=\sum_{i=1}^7 B_{5i}$)이 된다.

식(3.17)의 일반식은 식(3.18)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -\left[\sum_{i=1}^{n+1} B_{ki} + \sum_{i=n+1}^{m} B_{ki} V_i \cos \theta_{ki}\right]$$
(3.18)

단, k: 발전기 공용모선 번호

n: 공용모선에 연결된 발전기수

m : 분석 계통의 총모선수

송전선이 다수 일수록(즉, m이 클수록) 공용모선 민감도($\Delta Q/\Delta V$) 값이 커지기 때문에 따라서 공용모선 전압변화량(ΔV_H)에 대해 보다 큰 무효전력(ΔQ_H) 가 요구된다.

3.2.2 발전기공용모선의 무효전력 관계식

다수의 발전기가 발전기 공용모선에 접속되어 송전하는 경우 이 공용 모선에서의 무효전력 흐름에 따라 모선전압이 변한다. 중부하시는 발전소 에서 수전단으로 무효전력을 공급해야 하나 경부하시에는 발전단에 서 무효전력을 흡수하여 모선전압을 유지한다. 그림3.2는 4기 2회선 공용모선 임피던스도이다.

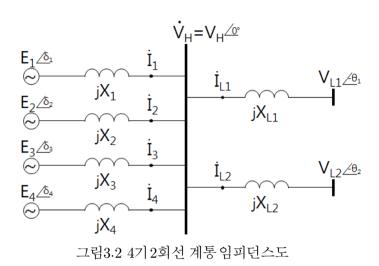


Fig. 3.1 Impedance diagram of 4 generators and 2 transmission lines

그림3-2의 4기 2회선 계통에서 발전기공용모선(V_H)에서 발전단과 수전 단을 바라 본 전력조류 방정식과 무효전력 값은 다음과 같다.

(1) 발전단에 기여한 무효전력 계산 일반식

$$\begin{split} \dot{W}_{Gi} &= \dot{V}_H (\dot{I}_{Gi})^* \\ &= P_{Gi} + j \, Q_{Gi} \,, \ i = 1, 2, \ \cdots, \ n \\ & \Leftrightarrow |\mathcal{P}_{Gi} = \frac{E_i V_H \mathrm{sin} \delta_i}{X_i} \,, \ Q_{Gi} = \frac{E_i V_H \mathrm{cos} \delta_i - V_H^2}{X_i} \end{split}$$

n: 공용모선에 연결된총 발전기수

식(3.19)에서 발전단에서 본 개별 발전기의 무효전력 발전량과 공용모선에서 본 전체 무효전력 발전량은 여러 단계를 거쳐 식(3.20) 및 식(3.21)과 같은 일반식으로 표현된다.

$$Q_{Gi} = \sqrt{\left(\frac{E_i V_H}{X_i}\right)^2 - P_i^2} - \frac{V_H^2}{X_i}$$
 (3.20)

$$Q_{Gtotal}^{[n]} = \sum_{i=1}^{n} Q_{Gi}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \left[\sqrt{\left(\frac{E_i V_H}{X_i} \right)^2 - P_i^2} - \frac{V_H^2}{X_i} \right]$$
 (3.21)

단, $i = 1, 2, \dots, n$

 $Q^{[n]}_{Gtotal}$: 공용모선으로 들어오는 n개발전기총무효전력량 그림 3.2의 4기 2회선 계통의 경우 $n\!=\!4$ 로 발전단 측이 기여하는 무효전력의 전체 합은 식(3.22)와 같다.

$$Q_{Gtotal}^{[4]} = \sum_{i=1}^{4} \left[\sqrt{\left(\frac{E_i V_H}{X_i}\right)^2 - P_i^2} - \frac{V_H^2}{X_i} \right]$$
(3.22)

(2) 수전단에 기여 무효전력 계산 일반식 수전단은 발전단에 기여한 무효전력 계산 일반식과 같은 방법으로 유도하면 된다.

$$\dot{W}_{Li} = (\dot{V}_H)^* \dot{I}_{Li}$$

$$= P_{Li} - j Q_{Li}, \ i = n + 2, n + 3, \ \cdots, \ m$$
(3.23)

여기서,
$$P_{Li}=rac{V_HV_{Li}\sin heta_i}{X_{Li}}$$
 , $Q_{Li}=rac{V_H^2-V_HV_{Li}\cos heta_i}{X_{Li}}$

m: 분석계통의총모선수

식(3.23)의해 공용모선에서 본 개별 송전단 공급 무효전력량과 전체 공급무효전력량은 발전단과 같은 방법으로 식(3.24) 및 식(3.25)과 같은 일반식으로 표현된다.

$$Q_{Li} = \frac{V_H^2}{X_{Li}} - \sqrt{\left(\frac{V_H V_{Li}}{X_{Li}}\right)^2 - P_{Li}^2}$$
 (3.24)

$$Q_{Ltotal}^{[m-(n+1)]} = \sum_{i=n+2}^{m} Q_{Li}$$

$$= \sum_{i=n+2}^{m} \left[\frac{V_H^2}{X_{Li}} - \sqrt{\left(\frac{V_H V_{Li}}{X_{Li}}\right)^2 - P_{Li}^2} \right] \quad (3.25)$$

단,
$$i = (n+2), (n+3), \dots, m$$

 $Q_{ltotal}^{[m-(n+1)]}$: 공용모선에서 송전하는 총무효 전력량

그림 3.2의 4기 2회선 계통의 경우 n=4, m=7로 수전단에 기여하는 무효전력의 전체 합은 송전선로가 m-(n+1)=7-(4+1)=2개임으로 식(3.26)과 같다.

$$Q_{Ltotal}^{[2]} = \sum_{i=6}^{7} \left[\frac{V_H^2}{X_{Li}} - \sqrt{\left(\frac{V_H V_{Li}}{X_{Li}}\right)^2 - P_{Li}^2} \right]$$
 (3.26)

따라서, 공용모선(V_H)에서 무효전력 수수(授受)에 따른 총 무효전력 변화량($\Delta Q_{Total}^{[m]}$)의 일반식은 식(3.21)과 식(3.25)로부터 식(3.27)과 같 이 표현할 수 있다.

$$\Delta Q_{Total}^{[m]} = Q_{Gtotal}^{[n]} - Q_{Ltotal}^{[m-(n+1)]}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} Q_{Gi} - \sum_{j=n+2}^{m} Q_{Lj}$$
(3.27)

단. m: 분석계통의총모선수

n: 공용모선에 연결된 총 발전기수

그림 3.2의 4기 2회선 계통의 경우 n=4, m=7로 총 무효전력 변화량은 식(3.28)과 같다.

$$\Delta Q_{Total}^{[7]} = Q_{Gtotal}^{[4]} - Q_{Ltotal}^{[2]}$$

$$= \sum_{i=1}^{4} Q_{Gi} - \sum_{j=6}^{7} Q_{Lj}$$
(3.28)

식(3.27)과 식(3.28)에서 발전기공용모선을 중심으로 발전단과 수전단의 무효전력이 같으면, 무효전력의 공급과 수요가 일치하여 전력조류 방정식에서 중간부하모선처럼 운전된다. 따라서, 무효전력 변화량이 없으면, $\Delta Q_{Total}^{[n]} = \Delta Q_{Total}^{[7]} = 0$ 으로 모선전압은 불변이다. 발전단이 수전단보다 크면, $\Delta Q_{Total}^{[m]} = \Delta Q_{Total}^{[7]} > 0$ 이 되어 전압이 상승하며, 반대로 발전단이 수전단보다 적으면, $\Delta Q_{Total}^{[m]} = \Delta Q_{Total}^{[7]} < 0$ 이 되어 전압이 하락한다.

3.2.3 발전기 1기 무한계통 AVR 스텝시험과 무효전력 공급한계

(1) AVR 스텝시험

한국전기연구원에서 500MW급 국내표준화력 대상으로 시행한 "하동화력 5-8호기 발전기·제어계 특성시험 및 모델 도출"시험에 의거 유효출력은 변동이 없고 고정자 단자전압을 스텝 변경할 때 무효출력만 변경하여 송전선로 등가임피던스 식을 유도하였다.

수식(3.29)는 발전기를 계통에 연결 후 2% AVR 스텝 시험 시 측정된 무효 전력 편차를 계산하여 등가임피던스를 도출하였다[8].

$$\Delta Q = \frac{\Delta V}{X} \tag{3.29}$$

식(3.29)와 식(3.18)에서 민감도식은 $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ 의 절대값으로 표현하면 약간의 일반화 과정을 거쳐 공용모선 k에서 등가리액턴스 (X_{eq}) , 총 모선수 m의 경우 식(3.30)과 같이 유도할 수 있다.

$$\left[\frac{\Delta Q}{\Delta V}\right]_k = \left[\frac{1}{X_{eq}}\right]_k = \left[B_{eq}\right]_k$$
 (3.30)

여기서, $\left[\frac{\Delta Q}{\Delta V}\right]_k$: 발전기공용모선 k의 민감도식

$$[B_{eq}]_k = [\sum_{i=1}^{n+1} B_{ki} + \sum_{i=n+1}^{m} B_{ki} V_i \cos \theta_{ki}]$$

그림 3.3은 AVR 스텝시험 1기 무한 계통도이다.

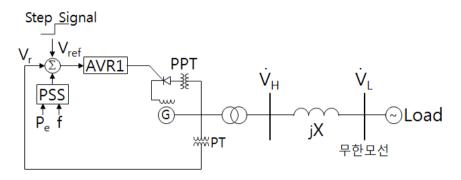


그림3.3 AVR스텝시험 1기무한 계통도

Fig. 3.3 One generator infinite bus system for AVR step test

(2) 발전기 무효전력 공급능력과 변화량 $(\frac{\Delta Q}{\Delta V})$ 범위

500MW급 발전기의 무효전력 한계는 OEL 240[Mvar] UEL (-)160[Mvar] 이다. 발전기 4기(2,000MW) 기준 (-)640~960[Mvar] 범위다.

전력계통 신뢰도 및 전기품질 유지 기준에 의거 345kV 계통의 전압조정목표는 $(353-17)kV\sim(353+7)kV$ 범위로 변동 폭 (ΔV) 은 0.067kV[pu]이다. 수식(3.29)에 의해 500MW 4기 경우 발전기공용모선 전압추이는 상기 기준전압 변동 량 (ΔV) 에 대해 무효전력 변동 량 (ΔQ) 은 230[Mvar]로 계산되며호기별로는 60[Mvar] 수준이다 $(X=0.18,\ 612MVA)$ 기준).

3.3 共用母線 電壓의 統合制御

3.3.1統合制御 原理

발전기공용모선의 전압은 연결된 발전기에서 생산(또는 흡수)된 무효전력의 합($\sum Q_{G_i}$)과 연결된 송전선로에서 흡수(또는 공급)되는 무효전력의 합($\sum Q_{L_j}$)에 영향을 받는다. 발전기공용모선의 전압조정 효과를 높이기 위하여 연결된 발전기 단자전압을 동시에 올리거나 또는 내리는 행위가 필수적이다. 현행과 같이 여러 운전원이수동으로 조작하는 방식으로는 동시 조작이 불가하며 결과적으로계통상황에 적합한 목표전압 제어를 위한 실효성과 신속성이 떨어지고 있다.

본 논문에서는 발전기공용모선 전압조정을 위해 연결된 모든 발전기 자동전압조정기(AVR)를 통합적으로 제어하는 방식을 제안하였다. 각 발전기의 운전정보(Q_{Gi} , V_{Gi} , V_{Ai})와 공용모선 전압(V_{H})를 측정하여 공용모선 전압조정을 위한 ΔV_{H} 를 계산하였다. 각 발전기의 AVR 전압조정 기준 값(V_{HGref})을 산출하여 모든 AVR을 조정하였다. 이 때 각 발전기별 소내 전력계통 전압(V_{Ai})의 운전범위를 유지하기 위하여 소내 모선전압 보호 알고리즘을 추가하였다.

3.3.2 統合制御 方法

식(3.29)에서와 같이 AVR 스텝시험을 시행하여 산출된 계통민 감도 계수 값 $([B_{eq}]_k)$ 을 이용하면 계통에 연결된 해당 발전기의 전압 변동 값 (ΔV) 에 대한 무효전력 변동 값 (ΔQ) 을 알 수 있다. 본 논문에서 제안하는 공용모선전압 통합제어 방식은 소내 모선전압(MV)운전범위 제한을 고려하고 목표하는 발전기공용모선 전압 제어를위해 연결된 발전기의 AVR를 통합적으로 제어하는 방식(QVCC)이다. 아래의 그림 3.4는 4기계통에 대한 공용모선 전압 (V_H) 제어를 위한무효전력-전압 통합 협조제어(QVCC) 개념도이다.

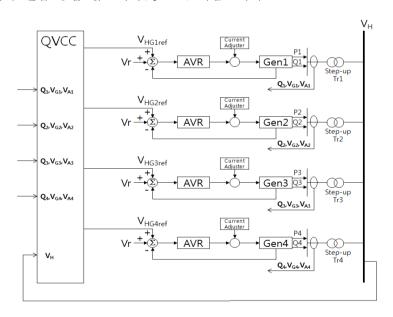


그림3.4 무효전력 — 전압통합협조제어(*QVCC*)도 Fig. 3.4 Diagram for QV Coordinated Control(QVCC)

또한, QVCC 통합제어 알고리즘은 그림 3.5와 같다.

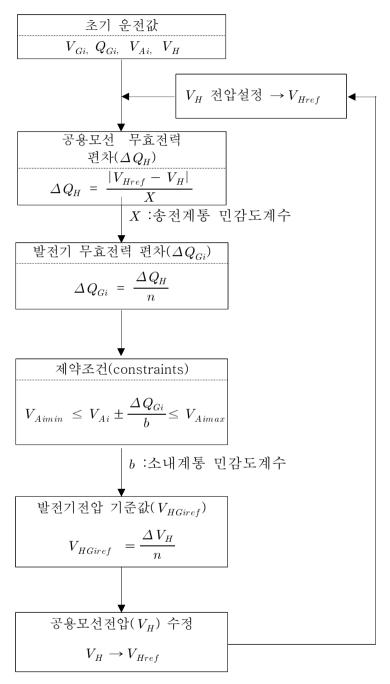


그림3.5 발전기공용모선 전압의통합제어알고리즘흐름도 Fig. 3.5 Flowchart of QVCC algorithm

그림 3.6은 그림 3.5의 QVCC 알고리즘을 실행하기 위한 제어 블록다이어그램으로 식(3.29)에서 도출된 등가임피던스 값을 이용하여 공용모선전압 변동 값과 전압보상을 위한 각 호기별 발전기 무효전력과 단자전압 변동 값을 연산하여 AVR를 통합제어 한다.

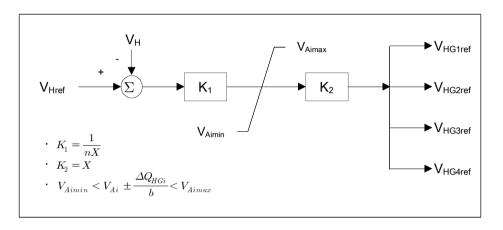


그림3.6 *QVCC* 제어 블록다이어그램 Fig. 3.6 Block diagram for QVCC control

여기서, K_1 은 소내 계통모선 전압에 의한 제약 요소를 구하기 위해 각 호기별 현재 소내 계통모선 전압 값에 발전기공용모선 전압 $(V_{H_{ref}})$ 조정 시 소내 계통모선 전압을 유지하는 데 필요한 요소다. V_{Aimin} 과 V_{Aimax} 값은 표 2.1과 같이 해당 발전기별 정상운전 또는 기동정지 시 소내 보조기기의 정상적 가동을 위해 정해진 운전범위다. 소내 계통 민감도계수(b)는 해당 발전기에 분배된 무효전력에 대응한 발전기전압 조정 시 소내변압기의 임피던스를 고려한 계수이다.

 K_2 요소는 각 발전기의 새로운 단자전압 기준 값을 위한 파라미터로 발전기별 균등하게 분배된다. 본 논문에서 AVR에 OEL 및 UEL 보호 기능을 보유하고 있기 때문에 본 놈문에서 제시한 알고리즘에는 무효전력 출력에 대한 제약은 고려하지 않았다.

第 4 章 事例研究

4.1 模擬系統

Matlab Simulink 환경에서 발전기 4기 공용모선에 대한 시뮬레이션 모델을 구축하고 기존과 같이 AVR을 개별 수동 조정하는 방식과 QVCC 적용 후 모선전압과 각 발전기별 단자전압 및 AVR 응동 추이를 비교 검토하였다. QVCC 제어 모델에서 사용한 발전기, 변압기 및 AVR 등에 대한 기본규격은 하동화력 5~8호기의 데이터를 사용하였다. 또한 발전기 및 AVR에 대한 파라미터 값은 한국전기연구원에서 시행한 발전기·제어계 특성시험 및 모델정수 도출 결과 데이터를 사용하였다. 사례연구를 위한 모의대상 분석계통은 그림 3.1과 같으며 모의계통의 주요기기 규격 및 정수 값은 표 4.1과 같다.

표4.1 모의계통의주요기기구격및정수값

Table 4.1 Major equipment specification and parameters for simulation

구 분	용량/긍장 (MVA/km)	규 격	형 식	정수 값
발전기	612	22kV	돌극기	$Q_{ ext{min}}$:-160 $Q_{ ext{max}}$:240
변압기	610	20.9/345kV	$\Delta - Y$	R:0.0027 L:0.07
AVR	_	출력(V_f) 입력(V_d, Vq)	IEEE type1	Ka:21.7 Ta:0.001(s)
PSS	-	입력 $(d\omega$) 출력 (V_{stab})	-	IEEE 421.5 정정값
조속기	550MW	PID 형	서보모터	초기기계력:0.75
송전선 로	16	345kV	Ⅱ 회로	L_1 :0.003[H/km] L_0 :4.1e-3 "
부하 Source	10,000	단락용량:40GVA 기준전압:345kV	내부결선 :Yg	X/R ratio :10

제안한 시뮬레이션 모델에 대한 QVCC 알고리즘 적용 전·후의 발전기 출력 값은 아래의 표4.2와 같다.

표4.2 모의계통의발전기출력값 Table 4.2 Generator outputs of Simulation

구 분		적용 전[pu]	적용 후[pu]
	G1	1.0	1.0
발전기출력	G2	1.0	1.0
(P_{Gi})	G3	1.0	1.0
G4		0.98	0.99

QVCC 적용 전 모델에서는 현재 발전소 운전원이 발전기공용모선 전압조정행위와 가장 유사한 형태를 고려하여 반복 계단(Repeating Stair) 함수를 사용하였다. QVCC 적용 후 모델에서 소내 계통모선 전압에 대한 제한은 모델 상에 반영하지 않았다. 3기와 4기 응동 모델에서 V_{Href} 값은 각각 1.02[pu]와 1.01[pu]로 하여 180초 동안 응동 추이를 관찰하였다.

Matlab Simulink 환경에서 사용한 모의계통도에 대한 QVCC 적용 전 및 적용 후 시뮬레이션 모델은 부록3 및 부록4와 같다.

4.2 結果分析

본 논문에서 제안한 QVCC 알고리즘을 적용 전·후의 발전기 단자전압 $(V_{G1},V_{G2},V_{G3},V_{G4})$ 및 공용모선 전압 (V_H) 변화 추이도는 그림 4.1, 그림 4.2, 그림 4.3 및 그림 4.4와 같다. 그림에 나타난 전압은 V_H :보라색, V_{G1} :노랑색, V_{G2} :파랑색, V_{G3} :주황색, V_{G4} :녹색을 나타낸다.

4.2.1 QVCC 적용 전 결과

그림 4.1은 QVCC 적용 전 발전기전압 (V_{Gi}) 과 공용모선 전압 (V_H) 추이를 나타낸다. ΔV_H 은 0.02[pu] 폭으로 변동하였으며, 발 전기간 $(V_{G2}-V_{G4})$ 에 무효전력이 순환됨을 확인 할 수 있었다.

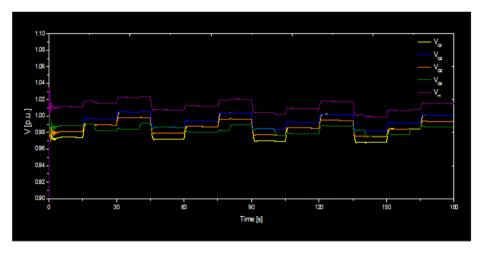


그림4.1 *QVCC* 적용전 전압변화추이도(4기응동)

Fig. 4.1 Voltage profile before QVCC applied (for 4 machines)

4.2.2 3기 모델 시뮬레이션 결과

그림 4.2는 V_{G1} 가 반복계단(Repeating Stair) 함수 변하고, V_{Href} 를 1.02[pu] 로 설정했을 때 $V_{G1}, V_{G2}, V_{G3}, V_{G4}$ 및 V_H 전압추이를 나타낸 것이다. V_{Href} 에 맞춰 V_{G2}, V_{G3}, V_{G4} 는 V_{G1} 과 반대로 응동하였으며 공용모선전압(V_H)가 개선되었음을 확인할 수 있다.

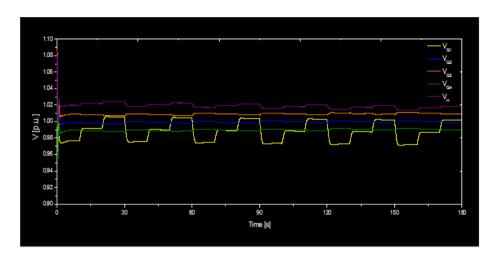


그림4.2 *QVCC* 적용후 전압변화추이도(3기응동) Fig. 4.2 Voltage profile after QVCC applied (for 3 machines)

4.2.3 4기 모델 시뮬레이션 결과

그림 4.3은 V_{G1} 이 Repeating Stair 함수 변하고, V_{Href} 를 1.01[pu]로 설정했을 때 V_{G2} , V_{G3} , V_{G4} , V_{G5} 및 V_H 전압추이를 나타낸 것이다. 그림 5.2와 같이 V_{Href} 에 따라 V_{G2} , V_{G3} , V_{G4} , V_{G5} 가 V_{G1} 과 반대로 응동하고 있으며 공용모선 전압 (V_H) 이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 4.3에서는 V_{G1} 과형은 생략하였다.

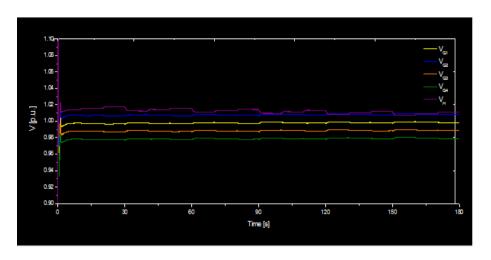


그림4.3 *QVCC* 적용후 전압변화추이도(4기응동)

Fig. 4.3 Voltage profile after QVCC applied (for 4 machines)

4.2.4 1기 응동 시뮬레이션 결과

아래의 그림 4.4는 V_{Href} 를 1.02[pu]로 설정했을 때, V_{H} 와 V_{G1} 추이를 나타낸 그림이다.

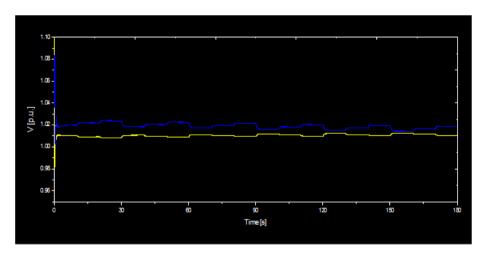


그림 4.4 *QVCC* 적용후 전압변화추이도(1기 응동)

Fig. 4.4 Voltage profile after QVCC applied (for a machine)

第5章 結論

본 논문에서는 발전기공용모선에서의 전압 및 무효전력 제어 알고리즘을 제시하였다. 모의계통 시뮬레이션을 통하여 공용모선전 압 및 발전기 전압추이를 분석하였다. 모의계통에 제안한 QVCC 알 고리즘을 적용한 사례연구를 통해 타당성과 효용성을 입증하였다. 본 연구에서 수행과 연구 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 발전기공용모선 전압제어를 위한 QVCC 알고리즘을 사용하여 AVR을 통합하여 제어함으로서 수동제어 방식보다 모선전압추이가 개선됨을 확인 할 수 있었다. 이로서 보다 일관성 있는 송전전압 신호를 제공함으로 수전단에서의 무효전력장치 운영에 효율을 제고 할 수 있다.
- (2) 연결된 AVR를 통합제어 함으로서 전압조정 행위의 동시성 및 일치성을 통해 발전기간 무효전력 순환 문제가 해소됨을 확인 할 수 있었다. 또한 현재와 같은 수동조정 방식에서는 발전소 운전원 간의 일치된 전압조정행위가 매우 중요함을 확인하였다.
- (3) 1995년부터 국내 대부분의 발전소를 대상으로 시행하고 있는 발전기·제어계 특성시험 및 모델정수 도출 시험 결과로부터 취득한 데이터를 기반으로 하여 해당 발전소별 발전기 제어계 및 송전계통 특성에 적합한 발전기공용모선 전압의 제어 알고리즘을 적용 할 수 있음을 확인하였다.

전력계통 용량 증대와 신재생용량 보급 확대에 따라 계통전압 관리 여건이 가혹해짐에 따라 발전기공용모선 전압관리의 중요성은 더욱 가중될 뿐만 아니라 향후, 무효전력거래제도 시행의 경우, 발·변전소의 무효전력 공급 장치의 운영 효율성 또한 매우 중요한 요소로 부각될 것으로 판단한다. 따라서 발전기공용모선 전압 관리에 대해 현재보다 더욱 개선된 방안의 시행을 적극적으로 검토 할 시점이라고 생각된다.

參考文獻

- [1] H.LEFEBVRE D.FRAGNIER. J.Y.BOUSSION P.MALLET. M.BULT. "Secondary Coordinated Voltage Control System: Feedback of DEF": 2000
- [2] J.B Davies, L.E. Midford. Manitoba Hydro, Winnipeg, canada "High Side Voltage Control at Manitoba Hydro" :2002
- [3] Sandro Corsi, Massimo Pozzi, Marino Sforno, Giuscppc Dell'Olio. IEEE Trans. Vol19, NO.4 "The Coordinated Automatic Voltage Control of the Italian Transmission Grid-Part II: Control Apparatuses and Field Performance of the Consolidated Hierarchical System": 2004.
- [4] Feng Dong, Badrul H. Chowdhury, Mariesa L. Crow, Levent Acar. IEEE Trans. VOL.20, NO.1 "Improving Voltage Stability by Reactive Power Reserve Management": 2005
- [5] Selma Awadallah, Jasna Dragosavace, Zarko Janda, Jovica V. Milanovic. IEEE Trondheim PowerTech. "Mathematical Model of SPP for Voltage and Reactive Power Control" :2011
- [6] Jasna Dragosavac, Zarko Janda, Jovica V. Milanovic. IEEE Trans. VOL.27, NO.3 "Coordinated Reactive Power-Voltage Controller for Multi-machine Power Plant" :2012.
- [7] Mauro Cimino, Prabhakar R. Pagilla. IEEE Trans. VOL.31, NO.6 "Reactive Power Control for Multiple Synchronous Generators Connected in Parallel" :2016.
- [8] 전기연구원, "하동화력 5~8호기 발전기·제어계 특성시험 및 모델 정수 도출":2010

附 錄

부록 1: 國內發電所의 發電機共用母線 運用現況

구 분	발전소명	공용모선	비고
765kV	당진화력	10기 2회선	154kV 제외
	신고리/고리원자력	5기 5회선	345연계 포함
(3개소)	신한울원자력	2기 4회선	
	고리원자력	4기 6회선	765연계 제외
	인천복합	9기 6회선	개폐소 제외
	POSCO 복합	7기 4회선	
	영흥화력	6기 4회선	
	서인천복합	16기 6회선	
	신인천복합	12기 2회선	
	동두천복합	6기 4회선	
	포천복합	6기 2회선	
	포천LNG 복합	3기 4회선	
	장문복합	6기 2회선	
	평택화력	9기 5회선	
	삼척GP	2기 6회선	
	양양양수	4기 2회선	
	북평TP	2기 3회선	
	보령#1,2	2기 2회선	연락T/L 포함
	보령#3,4,5,6	4기 2회선	
	보령#7,8	2기 2회선	
	신보령	2기 2회선	
	보령복합	6기 4회선	
	태안#1~6	6기 2회선	
	태안#7~10	4기 2회선	
345kV	GSEPS	4기 2회선	
(40=1) 2 \	현대그린파워	8기 2회선	
(43개소)	무주양수	2기 2회선	
	한빛#1,2	2기 2회선	연락T/L 미포함
	한빛#3,4	2기 2회선	
	한빛#5,6	2기 2회선	
	여수화력	1기 3회선	
	율촌복합	2기 2회선	
	광양복합	6기 2회선	
	한울#1,2	2기 2회선	
	한울#3,4	2기 4회선	
	한울#5,6	2기 2회선	
	월성N/P	4기 4회선	
	신월성	2기 4회선	
	청송양수	2기 2회선	
	예천양수	2기 2회선	
	울산화력/복합	12기 5회선	
	부산복합	8기 6회선	154kV 포함
	하동화력#1~4	4기 2회선	
	하동화력#5~8	4기 2회선	
	삼천포#1,2,3	3기 4회선	
	삼천포#4,5,6	3기 2회선	
	산청양수	2기 2회선	
154kV(63개소)	평택화력 등	5기 2회선	

부록2:500MW 發電系統(발전기/변압기/송전선로)의 定數

(1) 발전기 정수(기준용량 612MVA, pu)

구분	Ra	Xd	Χq	Xl	Χď	Χq΄	Xd"	Xq"
G1	0.0015	1.915	1.514	0.165	0.274	0.352	0.225	0.225
G2	0.0015	1.901	1.533	0.165	0.274	0.352	0.225	_
G3	0.0016	2.115	1.635	0.142	0.234	0.352	0.204	0.204
G4	0.0016	1.981	1.895	0.141	0.249	0.443	0.196	-

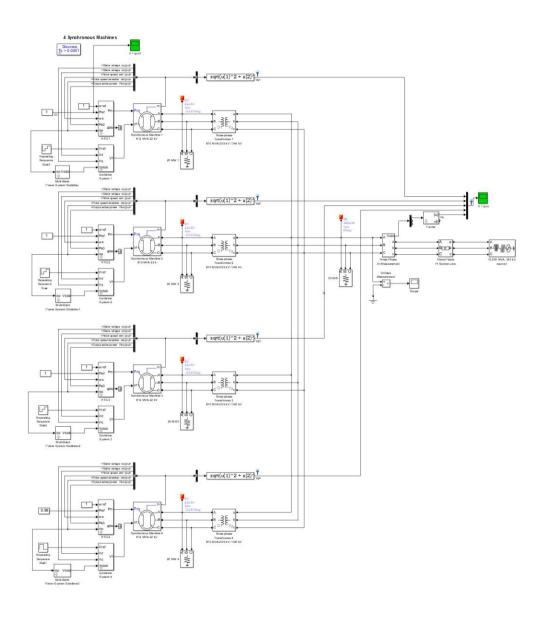
(2) 변압기 정수(기준용량: 545MVA, pu)

구 분	R	X	Ratio(R/X)	Z
T1	0.00237	0.1517	64	0.1517
T2	"	"	"	"
Т3	0.00217	0.1518	70	0.1519
T4	"	"	"	"

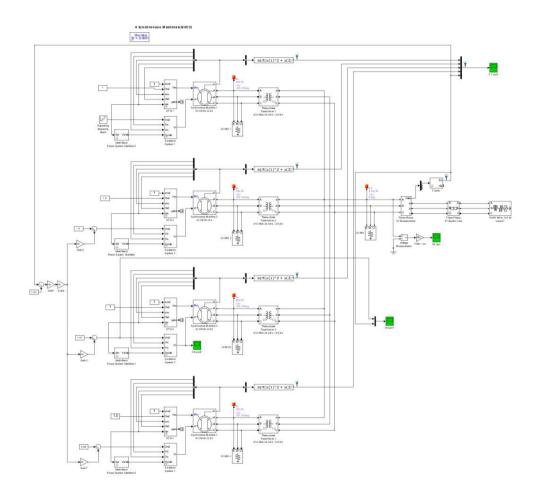
(3) 선로정수(기준용량 :100MVA, pu)

구 분	R	X	В
5-6(의령)	0.00088	0.01502	0.3808
5-7(광양)	0.0004	0.00691	0.17148

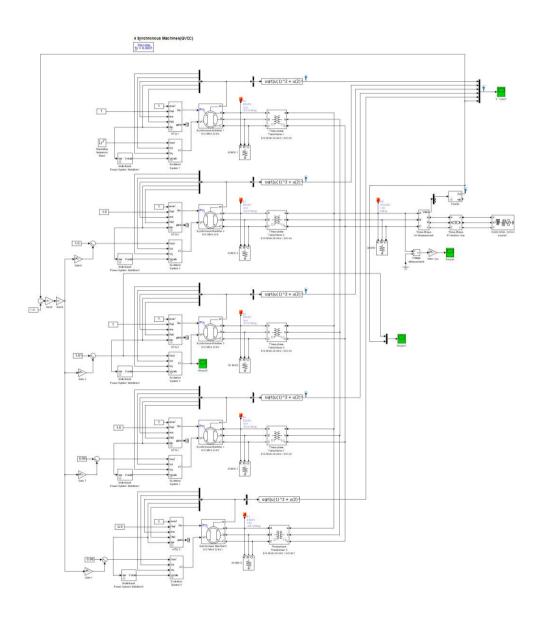
부록3: 4기 계통 시뮬레이션 모델(QVCC 적용 전)



부록4: 3기 계통 시뮬레이션 모델(QVCC 적용 후)



부록5: 4기 계통 시뮬레이션 모델(QVCC 적용 후)



Abstract

A Study the Coordinated Voltage Control at the Generator Common Bus

Hong Sung Ok Graduate School of Engineering Practice Seoul National University

This paper presents an integrated AVR control method for voltage and reactive power control at a generator common bus in case of a power plant where several generators are connected to the common bus through each step-up transformer. Currently, there are about one hundred power plants that operate the common bus in Korea, and the common bus voltage is controlled by several plant operators who manually control each AVR in an independent location. This paper proposes an algorithm(QVCC:Q-V Coordinated Control) to control the common bus voltage required in the grid by measuring the generator common bus voltage(V_H), terminal voltage(V_{Gi}) and reactive power(Q_{Gi}) of each generator.

The case study demonstrates the validity of the algorithm proposed in this paper using the configuration and data of Hadong thermal power plant unit $5\sim8$. The simulation model was constructed in MATLAB Simulink environment and was used to analyze the common bus voltage and each generators voltage by comparing before and after the application of the

QVCC. By using the proposed method, it was possibile to improve the common bus voltage profile and to solve the problem of reactive power circulation between generators. A management of the generator common bus voltage is a very important issue that directly affects the power system stability and the power plant operational efficiency and reliability. Therefore, it may be the right time to study and apply the proposed method rather than maintaining the method currently used.

Index Terms : Thermal power plant, Power plant electrical system, Generator common bus, Automatic voltage regulators(AVR).