

# 전력계통 안정화를 위한 전압보상설비 운용 방안

Operation method of Voltage Compensation Devices for power system stability

안 창 한\* · 백 영 식\*  
 (Chang-Han Ahn · Young-Sik Baek)

**Abstract** - A new algorithm for a coordinative control method is proposed with respect to voltage control and system stabilization of local substations. This is accomplished using control cooperation between a static synchronous compensator (STATCOM) and the existing voltage compensation equipment in the steady state and emergency state of a power system. A real-time system analysis was developed by combining a system analysis program with InTouch, which has primarily been used in factory automation for verification. PSS/E was used for the load flow calculation software, Python for language, Intouch as an HMI program, and MS SQL for the database. To test this system, the system in the vicinity of the Migeum and the Migeum substations was modeled and simulated.

**Key Words** : Back-to-Back method, Multiple method, PSS/E, Power System Stability, Intouch, HMI

## 1. 서 론

증가하고 있는 전력수요에 맞게 전력을 공급하기 위해 발전소와 송전설비에 대한 지속적인 투자가 필요하다. 그러나 전력수요에 맞는 투자는 환경적, 경제적 문제로 인해 지속적으로 증가하기 어렵다. 송전설비에 대한 투자의 어려움과 송전선로의 유도성 특징으로 인해 무효전력 제어는 전력계통의 관리와 제어에 있어서 핵심적인 요소이다. 무효전력투입과 차단을 통한 전압제어로 계통 안정화를 가져오며 현대의 고도정밀산업의 발달은 고품질 전압에 대한 끊임없는 수요를 발생시킨다. 무효전력은 부하의 관점에서 전압안정도에서 전압붕괴의 여유도에 포커스를 맞춘다. 발전기는 무효전력에 있어서 제약적이다. 부족한 무효전력에 대한 공급은 가능하나 장거리의 특성을 갖는 송전에는 그 취약함을 드러낸다. 따라서 무효전력은 적재적소의 필요한 곳에서만 보상해야 한다. 따라서 무효전력에 대한 제어가 계통전압안정화를 위해서는 필수적이다. 이에 계통의 전압 불안정에 대처하기 위해 FACTS 제어기의 속속 투입됨으로써 전력계통의 무효전력 제어 설비가 빠르게 최신화되고 있으나, 이를 통합 제어하기 위한 중앙제어방식과 각 지역송전계통에 포함되어 있는 기존의 전력용 콘덴서와 OLTC 등과의 협조 제어방식이 미흡하여 정상시의 전

압안정화는 물론 비정상 전압 불안정에 대처하는 능력의 향상이 필요한 상황이다[2].

전력계통의 정상상태와 비정상상태에서 STATCOM과 기존의 전압보상설비간의 제어 협조를 통한 지역 변전소의 전압제어와 계통안정화를 위한 협조제어방식에 관한 새로운 알고리즘을 제안한다. 검증을 위해 주로 공장 자동화에 사용 되어온 InTouch를 계통해석 프로그램과 접목 시킴으로써 실시간 계통 해석 시스템을 개발 하였다. 전력조류계산 소프트웨어는 PSS/E를 사용하였으며 언어는 Python, HMI 프로그램은 Intouch, DB는 MS SQL을 사용하였다. 이 시스템의 테스트를 위해 미금 인근 지역 계통과 미금 변전소를 모델링하고 시뮬레이션 해 보았다.

## 2. 변전소 설비의 협조 제어

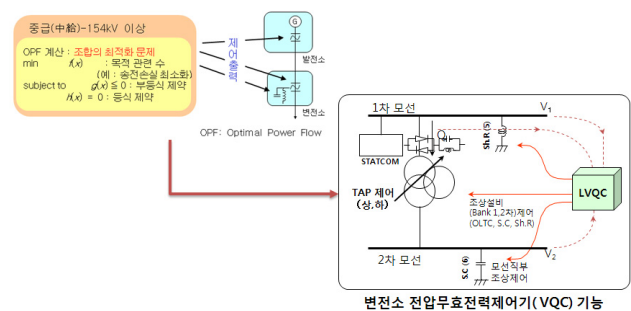


그림 1 지역 변전소에서의 무효전력 협조제어  
 Fig. 1 Reactive power control of local substation.

\* Corresponding Author : Dept. of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Kyungpook National University, Korea.  
 E-mail: ysbaek@knu.ac.kr

\* Dept. of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Kyungpook National University, Korea.

Received : February 07, 2015; Accepted : March 24, 2015

그림 1은 단위 변전소 차원의 STATCOM-Shunts-OLTC 간의 협조제어 방식을 나타낸 것이다. 제어에 필요한 기준 전압, 기준 무효전력과 순동무효전력량은 중앙급전에서 받게 되며, 해당 변전소에서는 각 전력설비(STATCOM, 리액터, 커패시터, OLTC)의 전압감도를 미리 계산하여 전압오차를 제어할 수 있는 오차무효전력을 산출한다. 이 값에 1차적으로 STATCOM이 가지고 있어야 할 순동무효예비력(spinning reserve)과 기계식 커패시터 뱅크에 의해 고속 응답할 수 있는 커패시터의 예비력을 더한 값이 지역변전소에서 부담해야 하는 무효전력 제어값이다.

표 1 각 제어 기기의 근사 동작 시간 영역

Table 1 Approximate operation time range of each controller.

시간	$t_0 \sim t_1$ (ms)	$t_1 \sim t_2$ (sec)	$t_2 \sim t_3$ (ten sec)
동작 기기	STATCOM	Shunt Elements	OLTC
목적	순동무효예비력 확보	정상 무효전력 확보	무효전력재분배

계통의 외란 발생 시 첫 번째로 STATCOM이 동작하며 전압 오차가 미리 설정한 오프셋을 초과하면 기계식 뱅크가 동작하여 전압을 조정하고 순동무효예비력을 확보한다. OLTC는 탭 동작 한계 내에서 동작 유무를 판단하여 동작시 기계식 뱅크의 무효전력여유량을 확보하도록 한다.

본 논문에서 제안한 협조 제어 기법을 실 계통에 적용하기 위해 먼저 대상 전력 계통에 대한 특성 분석이 이루어져야한다. 따라서 협조 제어 알고리즘 개발과 병행하여 계통의 특성에 부응하는 제어를 위하여 적용 대상인 미급 변전소를 중심으로 한 계통 특성 분석이 이루어져야 한다. 본 장에서는 첫 번째로 2014년 우리나라 경부하, 중부하, 침두부하 시 계통 데이터에 대한 정상 상태 해석을 PSS/E로 수행하여 향후 연구에 있어 신뢰할만한 기본 자료로 활용하도록 하였다. 두 번째로 변전소 대상 계통에 대한 과도해석 모형을 개발하여 모의 분석함으로써 과도 상태 운전 방안을 제시하였다.

모선의 전압 변동에 따른 무효전력의 투입량을 결정하기 위하여 분석하였으며, 경부하는 조류계산에서 이용한 데이터 중 70% 부하를 선정하였고, 중부하는 80%, 침두부하는 100% 부하를 선정하였다.

감도계산은 각 모선에 전압보상설비를 동작시킨후 전압의 변

표 2 PSS/E를 이용한 감도 계산 결과

Table 2 Voltage sensitivity calculation results using PSS/E.

	dV1/dQ	dV2/dQ
STATCOM	0.0053	0.0051
Sh.R	0.0042	0.0043
Sh.C	0.0032	0.0052
OLTC	0.0008	0.0108

화량을 확인하였으며, 그 결과는 표 2.2과 같다.

변전소 내의 제어운전은 4가지 상태로 정상상태, 정상운전상태, 비상상태, 그리고 순동예비력 확보 제어로 분담하였다. 전력 계통의 모든 문제는 조류 계산을 바탕으로 한 정상 상태 해석으로부터 시작된다. 조류 계산, 고장계산 그리고 전압-무효전력 감도계산을 수행, 투입 무효 전력량과 전압 제어량간의 상관관계를 계산하여, 비상 상태 시 미급 변전소와 인근 계통의 무효전력장치를 신속히 제어하기 위한 투입량을 산정하는데 활용되도록 하였다.

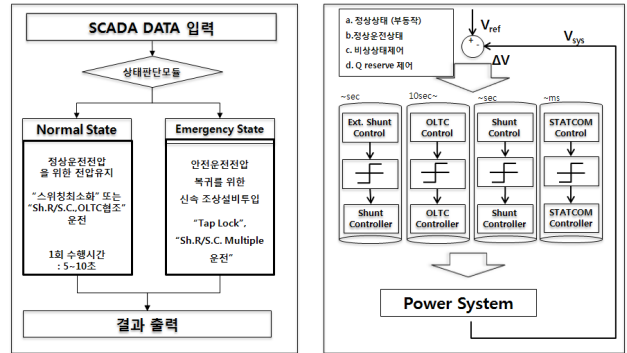


그림 2 계통상태에 따른 무효전력 협조제어

Fig. 2 Reactive power control according to state of power system

### 3. 정상상태 시 전압제어 방안

각 제어 기기의 행동 특성을 고려한 STATCOM-Shunt elements-OLTC 간의 투입 순서 알고리즘은 그림 3과 같이 제안한다.

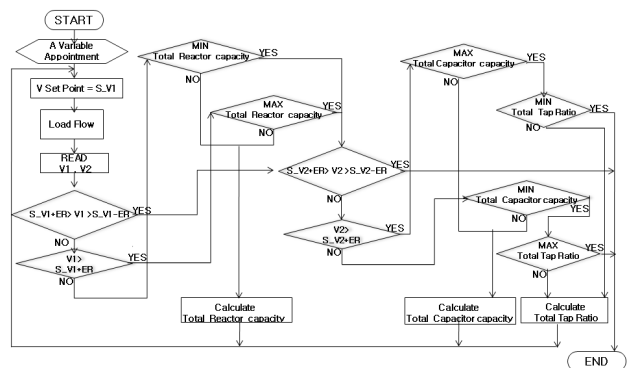


그림 3 순차 전압 제어 알고리즘

Fig. 3 Back-To-Back voltage control

정상상태전압 시 협조 제어 알고리즘으로 순차제어방식과 STATCOM Qreserve 방식을 제안한다. 순차제어 방식은 변전소의 1차, 2차 모선전압이 변압기에 의해 서로 종속된 관계로 가정

한다. 따라서 1차 모션전압을 먼저 측정하여 만약 측정된 전압이 설정된 부감대를 넘게 되면 병렬형 리액터 뱅크가 동작하도록 하였다. 동작 이후 순차적으로 2차 모션 전압을 측정하여 계통 외란이 해소된다면 2차 측 조상설비는 동작하지 않도록 하였고, 만약 측정된 전압이 부감대를 넘게 되면 2차 측 모션에 설치된 병렬형 커패시터 뱅크가 동작하도록 설정하였다. 마지막으로 OLTC를 동작시켜 시스템 전압이 기준 전압을 만족하도록 구현하였다. 이러한 제어알고리즘은 각 무효전력설비의 전압감도를 미리 계산하지 않고 실시간으로 판단하는 것으로 계통적용을 위해서는 실시간 전압감도계산을 통하여 투입 최소화를 목적으로 하는 제어 기법이 개발되었다.

Q reserve 방식은 앞선 순차 제어 방식에서 STATCOM의 가용범위를 최대로 하기 위해 조상설비를 스위칭한다. 연속제어방식인 STATCOM의 정확성과 신속성을 최대한 활용하여 안정화를 한다는 목표로 개발되었다.

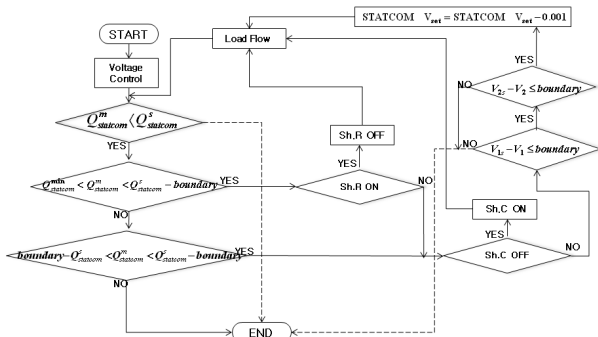


그림 4 STATCOM 순동무효전력 확보 알고리즘  
Fig. 4 Detailed algorithm for Q reserve of STATCOM

#### 4. 비상상태시 전압제어 방안

전압 안정화를 위해 FACTS와 기존 조상설비의 협조 제어에 있어 정상 상태 제어만 고려한다면 비상상태 발생 시 전압 붕괴를 초래할 수도 있다. 따라서 PSS/E 상에서 선로사고를 모의해서 전압오차의 설정치를 잡아서 비상상태의 범위를 설정하였다. 표 3은 미금변전소와 각 지역 변전소의 선로 사고시 전압변화량이다. PSS/E peak data 상에서 시뮬레이션 해본 결과이다. 미금 1,2차측 초기저압과 사고전압의 오차를 계산해 봄으로써 비상상

표 3 선로 사고시 전압감도  
Table 3 Voltage sensitivity 시 line fault

	미 금	
	1차측 전압	2차측 전압
초기 전압	1.0275	1.0345
성 동	1.0077	1.0155
신가평	1.0183	1.0251
의정부	1.0276	1.0341
동서울	1.0290	1.0352

태 알고리즘의 적용 가이드라인을 세울 수 있다. Qreserve 방식은 정상상태에서는 전압제어가 잘 이루어졌다. 그러나 비상상태 시의 문제점을 확인할 수 있었다. 전압안정화 범위에는 들어왔으나 빠른 전압 회복을 목적으로 하는 비상상태에서는 순차적으로 설비 투입/차단하는 방식이 맞지 않는 것이다.

비상상태에서 빠른 전압제어를 위한 알고리즘의 개발이 필요하다. Multiple방식은 앞서서 제안했던 Qreserve방식보다 신속하게 전압제어가 가능하다.

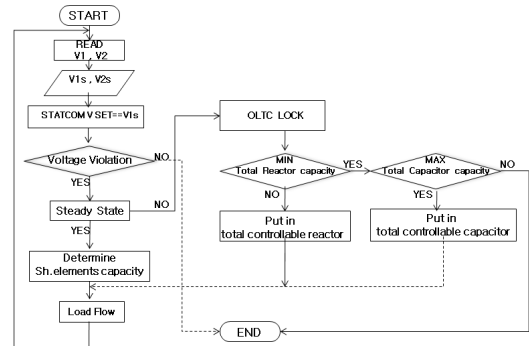


그림 5 비상상태시 협조제어알고리즘  
Fig. 5 Coordinative control detailed algorithm in emergency-state operation.

비상상태라고 판명되면 현재 가동할 수 있는 모든 설비를 한꺼번에 투입 해 함으로써 신속하게 전압 안정화를 이룬다.

### 5. 사례연구 및 시뮬레이션 결과

#### 5.1 시스템 구성

제한한 전압제어 알고리즘을 검증하기 위해 실제 현장에서 사용되어지고 있는 SCADA SYSTEM과 동일한 실시간 전력계통해석 엔진의 개발을 하였다. 이를 위해 계통해석 프로그램으로 PSS/E를 이용 하였고, PSS/E Data를 통신 시켜주기 위해 Python 언어를 이용하였다. DB는 SQL을 사용하였으며 최종적으로 계통해석을 시각화하고 제어 할 수 는 HMI는Intouch로 구현 하였다.

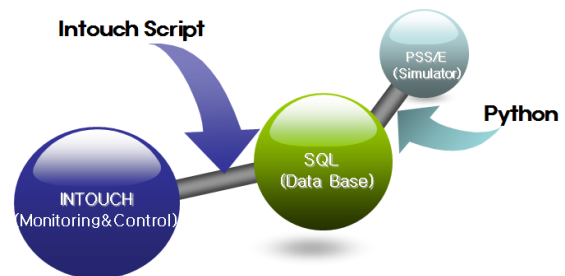


그림 6 Intouch-PSSE 시스템 모식도  
Fig. 6 The schematic diagram of Intouch-PSSE system

단위변전소의 전압보상설비 제어를 위해 인터치 화면상에 그림 7와 같이 구현하였다. 어플리케이션 투입에 따른 미급 변전소의 전압제어와 함께 계통 전체의 변화를 해석하기 위해서 각각의 모선의 전압, 무효전력, 유효전력을 나타냈다. 사용자가 변전소 내부 어플리케이션의 투입에 따른 전압값의 변화뿐만 아니라 계통 전체의 변화도 확인할 수 있게 개발하였다. 최종적으로 계통 해석의 시각화를 통한 HMI를 구현하였다.

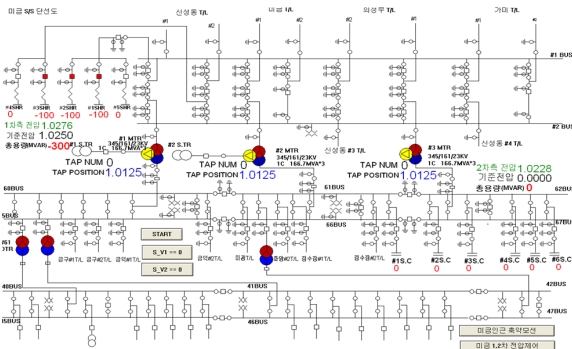


그림 7 최적화시스템 HMI 화면  
Fig. 7 HMI monitor of Intouch-PSSE system

5.2 정상상태 전압제어 결과

그림 8은 계통의 상황에 따라 1차, 2차 모선 전압이 변화하는 상황을 가정하여 제안한 협조 제어 알고리즘의 제어 특성을 비교해 봄으로써 Qreserve 알고리즘의 효용성을 나타내려 한다.

예비력이 확보된 STATCOM이 동작할 경우 빠른 속도와 정확성으로 최소의 설비 투입으로 전압 제어가 가능하다는 결과를 보

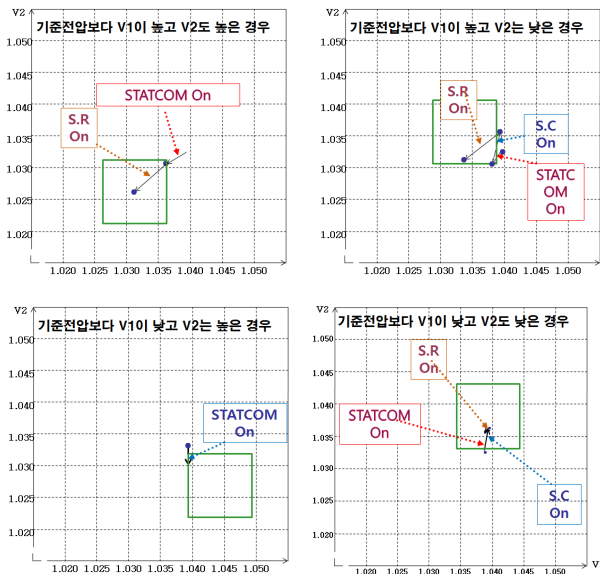


그림 8 Q reserve 전압 제어 결과  
Fig. 8 Result values for Q reserve of STATCOM

여준다.

미급1차측 2차측 기준전압을 1.025p.u., 허용범위를 0.005p.u.으로 설정하고 시뮬레이션한 결과 그림 9와 같이 정확히 허용범위 안에 들어오는 것을 확인할 수 있었다.

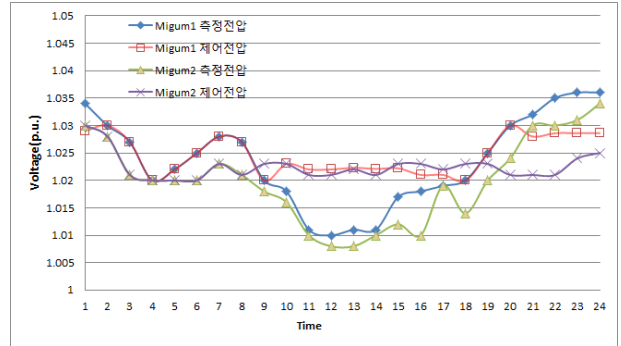


그림 9 정상상태 전압 제어 결과  
Fig. 9 Result values for Back to Back voltage

그림 10에서 경부하시 예비력 확보 결과로 Back-to-Back 전압제어 결과 STATCOM 용량은 커패시터 모드 3.65Mvar인데 반해 STATCOM Q reserve 알고리즘 적용후에는 인덕티브 모드 48.05Mvar로 확보되었다. 이과정에서 리액터 한 대가 차단되었고 커패시터 한 대가 투입되었다. 전압은

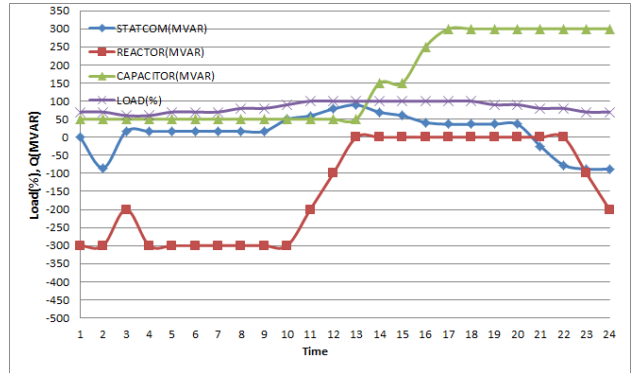


그림 10 정상상태 전압 제어 결과  
Fig. 10 Result values for Back to Back voltage control

1차측 전압은 STATCOM의 영향으로 유지되었고 2차측 전압은 바뀌었으나 전압안정화 범위안에서 움직였다. 중부하시에는 인덕티브 모드 67.45Mvar로 예비력 확보되었고 리액터와 커패시터를 이용하였다. 피크 부하시 예비력 확보를 위해 커패시터가 투입되었고 예비력은 목표치만큼 확보되었다.

확보된 예비력을 기반으로 STACOM과 조상설비를 순차적으로 동작하며 전압제어가 이루어 졌다.

그림 11은 허용범위로 정의한 0.005p.u. 기준으로 정확한제어 정도를 나타내었다. 기준전압과 허용범위를 벗어나지 않고 각 설비의 민감도에 따라 허용범위 안에서 오차가 발생함을 확인하였다.

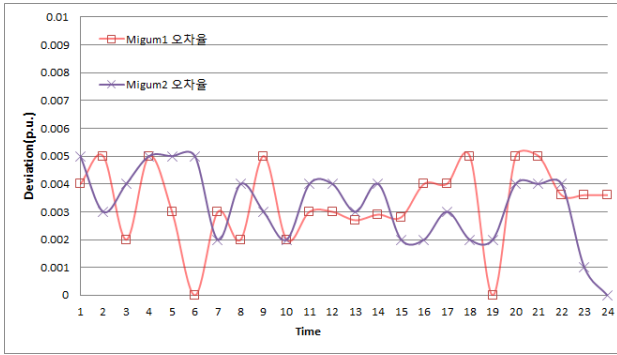


그림 11 정상상태 무효전력 제어 결과  
 Fig. 11 Result values for Back to Back reactive power control

5.3 비상상태 전압제어 결과

PSS/E 상에서 선로사고를 모의해서 전압오차의 설정치를 잡아서 비상상태의 범위를 설정하였다. 사고 전 전압과 사고 후 전압과의 차는 1차측은 0.04 p.u, 2차측은 0.052 p.u로 나타났다. 그림 12는 비상상태 시의 전압제어 결과 이다. 13시 선로사고로 미금 1차측, 2차측 전압이 각각 1.051p.u., 1.06p.u.로 사고 상태에 도달하였다.

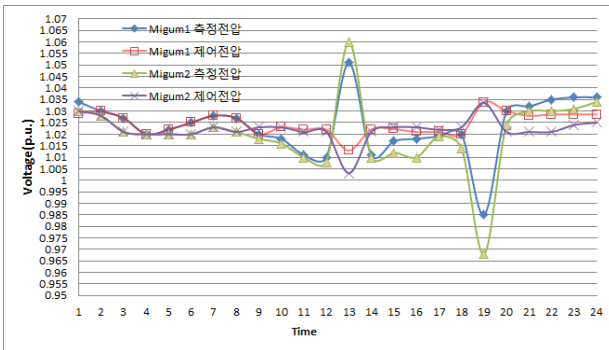


그림 12 비상상태 전압 제어 오차율  
 Fig. 12 Result values for Emergency voltage control

그림 13에서는 사고판단 후 가용 가능한 범위에서 STATCOM이 응동하였고, Shunt Reactor가 모두 투입되었다. 정상 전압제어 즉 Qreserve방식에 기반을 둔 순차제어 방식(Back to Back 방식)과 달리 한번에 전압제어가 이루어져서 비상상태시 대응이 가능하였다.

그러나 그림 14과 같이 전압제어가 기준 전압인 1.025p.u.와 허용 범위 0.005p.u. 기준으로 정확히 이루어지지 않는 사례도 확인 되었다.

신속한 제어는 가능했으나 오차가 발생함으로써 전압안정화와 설비투입의 신속성이라는 두가지 조건을 동시에 만족시키는 알고리즘의 개발에 필요성이 재기된다.

표 4는 경부하에서 345KV 선로 사고시 Multiple알고리즘 적

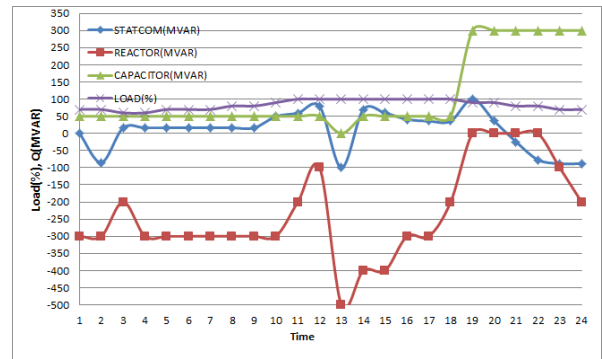


그림 13 비상상태 무효전력 제어결과  
 Fig. 13 Result values for Emergency reactive power control

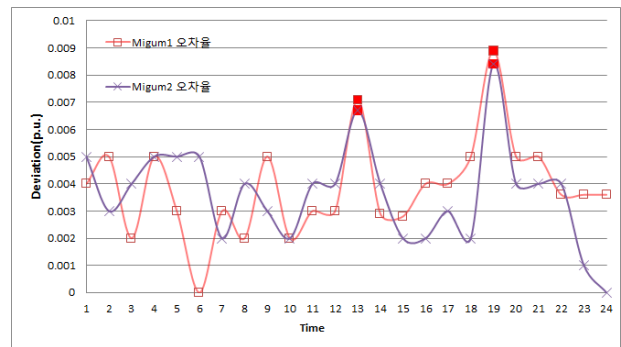


그림 14 비상상태 전압 제어 오차율  
 Fig. 14 Result values for Emergency voltage control

표 4 전압 안정화를 위한 스위칭 비교

Table 4 Result values of switching for stability

	Back-to-Back				
	L	C	Vset	time	error
경	3	4	1.0766	1	0
중	5	3	1.0882	1	0
피크	2	0	1.0506	1	0

	Multiple				
	L	C	Vset	time	error
경	3	6	1.0766	2/7	0.0071
중	5	6	1.0882	1/4	0.0069
피크	2	2	1.0506	1	0.0008

용 결과이다.

현재 동작 가능한 설비는 STATCOM 68.22Mvar 이고 리액터 3대, 커패시터 6대이다. 탭은 설비 특성상 비상 상태시에는 동작하지 않도록 설정하였다. 그 결과 1차측과 2차측 전압은 과도한 설비투입으로 인해 0.0071만큼의 오차가 발생하는 사례가 발생하였다.

그러나 사고 발생에서 가장 중요한 시간 관점에서는 기존 정



상상태 알고리즘인 Back to Back 방식대비 경부하, 중부하 일 경우 각각 2/7, 1/4 시간만큼 빠르게 대응하다는 결과가 도출되었다.

### 5. 결 론

전력 계통 특성 분석을 기반으로 협조 제어기법을 제안하였으며, 검증에 위하여 조류계산 해석 엔진인 PSS/E를 이용하여 실 계통 상황을 모의하였고, Intouch를 이용하여 HMI 시스템을 개발하였다. 계통의 상황에 따라 1차, 2차 모션 전압이 변화하는 상황을 가정하여 제안한 협조 제어 알고리즘의 제어 특성을 확인하였다.

정상상태 시 Qreserve기반 순차제어 알고리즘은 순차적으로 전압보상설비를 운용함으로써 전압 안정화를 가져다 주는 방식으로 전압 안정화 범위 안에서 예비력이 확보된 STATCOM을 이용한 전압 제어가 가능했다. 그러나 신속한 제어가 이루어지지 않는다는 문제점이 발생했다.

비상 상태시 전압제어 알고리즘인 Multiple 방식은 Q reserve에 기반을 둔 Bcak to Back 제어 방식의 문제점을 보완하기 위해 개발된 알고리즘으로 비상상태시에 신속하게 전압제어가 가능하다는 이점이 있다.

지역계통의 전압 안정화를 위해 계통 상태에 따른 전압보상설비 운용기법을 제시하며 이를 실 계통 모델에 적용하여 제어 특성을 검증하였다. 이는 지역 전압안정화를 위해 FACTS 기기인 STATCOM과 기존 소내 조상설비간의 협조 제어에 관한 새로운 시도이며 SCADA/EMS 방식의 변전소 운영을 고려한 실시간 HMI 시스템을 개발하여 실증했다는데 의의를 지니고 있다. 이 연구를 통하여 변전소 차원에서 전압 안정화를 위한 무효전력기기간의 협조 제어에 관한 최적 운전 방안이 마련 될 것이며, 전압 보상설비의 실계통 적용시 본 논문은 많은 도움을 줄 것이다.

### References

- [1] S.T Cha and K.W Cho "A Real-Time Simulator for Power System Studes" 1998 KIEE
- [2] Ji-Ho Park, Young-Sik Baek "Coordination Control of Voltage Between STATCOM and Reactive Power Compensation Devices in Steady-State" 2012 JEET
- [3] Chang-Han Ahn, Young-Sik Baek "InTouch HMI Development to Real-Time Power System Analysis" 2009 KIEE
- [4] X. Qi, M. V. Salapaka, P. G. Voulgaris, and M. Khammash, "Structured optimal and robust control with multiple criteria: a convex solution," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 49, No. 10, pp. 1623-1640, October 2004.
- [5] Chang-Han Ahn, Young-Sik Baek "Optimal Operation using ILP of Voltage Compensation Equipment for Voltage Stability of Power System" 2011, Theses for

Master's Degree

- [6] "Tools for Real-Time BusinessIntegration and Collaboration," *IEEE Transactions on Power System* Vol.18, No. 2, May 2003
- [7] S.T Cha and K.W Cho "A Real-Time Simulator for Power System Studes" 1998 KIEE

## 저 자 소 개



### 안 창 한(Chang-Han Ahn)

1980년 2월 12일생. 2009년 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2011년 동대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(석사).

현재 동대학원전자전기컴퓨터학부 재학(박사).

Tel : (053) 940-8802

E-mail : changhan.ahn@knu.ac.kr



### 백 영 식(Young-Sik Baek)

1950년 7월 8일생. 1974년 서울대 전기공학과 졸업. 1979년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1977년 명지대 전기공학과 조교수.

현재 경북대 전자전기컴퓨터학부교수.

Tel : (053) 950-5602

E-mail : ysbaek@knu.ac.kr