

비상상태 전압제어를 위한 무효전력보상설비의 최적 운용

Optimal Operation of Reactive Power Compensation Devices for Voltage Control of Emergency Status

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

Abstract - This paper proposes a method for solving running cost problem by minimizing switching reactive power compensation devices. An objective function was modeled by calculating the weighting value of cost, and a solution was derived using ILP. This paper suggests optimal coordinative control method between FACTS, Shunt Reactors, Capacitors and OLTC. Therefore, it is valuable for decision maker in determining order and capacity of devices which gaining a voltage stabilization. As a result, the objectives of voltage stabilization and cost minimization were achieved simultaneously. This realizes the economic efficiency of the system. We start by showing how to solve systems of linear equations using the language of pivots and tableaux. The effectiveness of this technique is demonstrated in modified PSS/E MIGUM 45 bus system. The simulation results show the effectiveness of this algorithm by comparing the outcome with several established methods.

Key Words : Back-to-Back method, Multiple method, Optimization method, Power System Stability

1. 서 론

전자통신기술의 발전과 뉴 미디어의 등장으로 전압의 저하도 허용하지 않는 복잡한 전력기기에 대한 고품질의 전력 공급이 요구되고 있기에, 이에 대한 대책 마련이 필요한 시점이다. 복잡하고 정밀한 전자회로로 구성된 이런 기기들은 조그만 전압변동이나 정전사고에도 오작동을 일으키거나 파괴될 수 있기 때문에, 보다 안정적이고 신뢰성 있는 전력 품질이 요구된다. 문제는 전력 계통의 전압은 수요 및 공급력에 변동에 따라 시시각각 변화한다는 점이며, 이러한 변화를 일정한 범위로 끌어둘 수 용가가 지장 없이 전기기기를 사용할 수 있도록 하는 것이 전압 조정의 목적이다. 일반적으로 전압을 적정 값으로 유지하기 위해서는 전력 계통에 산재하는 각 전기소의 무효전력을 제어할 필요가 있으며, 발전기 전압이나 역률 조정, 전압 조정 기기 및 각종 보상설비의 공급 운용에 의해 전력 계통의 전압 조정을 실행하고 있다.

본 논문에서는 대응량 수용가에서 차별화된 제어요소를 고려한 전압 무효전력 최적제어 알고리즘을 제시함으로써 계통 손실 감소 그리고 수전역률 개선을 고려한 운전비용 최소화를 목적으로 한다. 향후 실시간 지능형 전압관리시스템의 온라인 적용을

위한 제반 문제가 해결 될 경우 제한한 알고리즘은 대응량 수용가의 유효전력 손실감소와 수전역률 유지를 고려한 운전효율 향상에 따른 경제적 이익과 계통의 전압 분포 개선에 기여할 것이다.

이를 위해 단위 변전소 차원의 지역협제어 방식을 채택하였다. 각 전압보상설비들은 지역 대표 모선의 전압조정을 목적으로 상위지령 또는 해당 전력소의 운영자에 의해 수동으로 운영된다. 변전소 1차, 2차 모선전압으로부터 국지적인계통 상황을 판단한다. 지역제어장치에 의해 전압 불안정상태로 판단된 경우 STATCOM을 포함한 소내 무효전력설비에 동작지령을 내보내게 된다. SCADA/EMS 전압지령을기준 전압으로 하여 실제 측정된 시스템 전압과의 비교를 통해 전압오차를 발생시켜 설정된 허용 범위를 초과하면 전압 불안정상태로 가정하였다. 각 전압보상기기의 응답 특성을 반영한 협제어 알고리즘을 자체 개발한 HMI 시스템에 적용해서 시뮬레이션 하였다.

2. Multiple 전압제어

2.1 알고리즘 정의

정상상태에서의 전압보상설비의 순차 제어 방식은 협제어 측면에서는 효율적인 전압 제어가 가능하지만 각 설비를 이 위치 해 있는 지역만 고려 한다는 점에서 그 한계가 있다. 또한 비상상태 시 신속한 전압제어에 어려움이 있다. 따라서 선로 사고시 비상상태 범위를 설정하고, 신속한 전압제어 알고리즘의 개발이 필요하다. 이에 PSS/E 상에서 선로사고를 모의해서 전압오차의 설정치를 잡아서 비상상태 의 범위를 설정하였다 . 표1은 미금변

* 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 Univerity, Korea.

Received : March 16, 2015; Accepted : April 29, 2015

전소와 각 지역변전소 의 선로 사고 전압변화량이다. PSS/E peak data 상에서 시뮬레이션 해본 결과이다. 미급 1,2차측 초기 저압과 사고전압의 오차를 계산해 봄으로써 비상상태 알고리즘의 적용 가이드라인을 세울 수 있다.

표 1 선로 사고시 전압감도

Table 1 Voltage sensitivity 시 line fault

	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

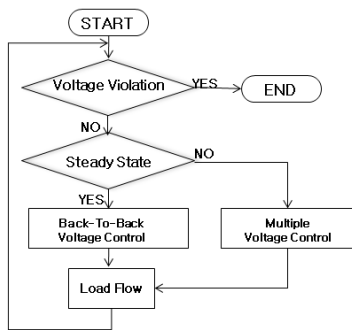


그림 1 비상상태시 Multiple 알고리즘

Fig. 1 Multiple control flowchart in emergency

각 변전소 별 비상상태의 범위를 정의하고, 전압오차가 허용 범위를 벗어 날 경우, 현재 가동할 수 있는 모든 전압보상설비를 한번에 동작시켜서 제어하는 방식을 그림 2의 방식으로 제안했다.

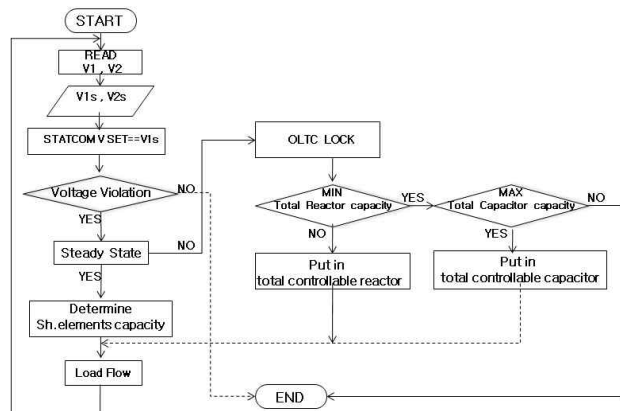


그림 2 비상상태시 Multiple 상세 알고리즘

Fig. 2 Multiple detailed algorithm in emergency-state operation

PSS/E 상에서 선로사고를 모의해서 전압오차의 설정치를 잡아

서 비상상태의 범위를 설정한 결과 사고 전 전압과 사고 후 전압과의 차는 1차측은 0.04 p.u, 2차측은 0.052 p.u로 나타났다. 1차측 전압과 2차측 전압의 측정값과 기준전압과의 차가 정상상태 전압 범위를 벗어 날 경우 비상상태로 판단하고 OLTC를 제외한 모든 설비가 투입된다.

2.2 시뮬레이션 결과

PSS/E 상에서 선로사고를 모의해서 전압오차의 설정치를잡아서 비상상태의 범위를 설정하였다. 사고 전 전압과 사고 후 전압과의 차는 1차측은 0.04 p.u, 2차측은 0.052 p.u로 나타났다. 그림 3은 비상상태 시의 전압제어 결과 이다. 13시 선로사고로 미급 1차측, 2차측 전압이 각각 1.051p.u., 1.06p.u.으로 사고 상태에 도달하였다.

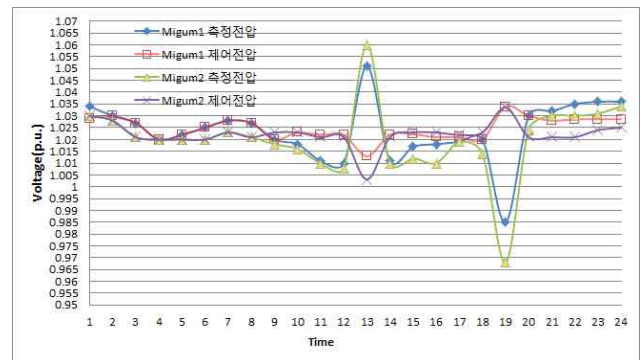


그림 3 비상상태 Multiple전압 제어

Fig. 3 Result values for Multiple voltage control

그림 4에서는 사고 판단 후 가용 가능한 범위에서 STATCOM 이 응동하였고, Shunt Reactor가 모두 투입되었다. 정상 전압제어 즉 Qreserve방식에 기반을 둔 순차제어방식(Back to Back 방식)과 달리 한번에 전압제어가 이루어져서 비상상태시 대응이 가능하였다.

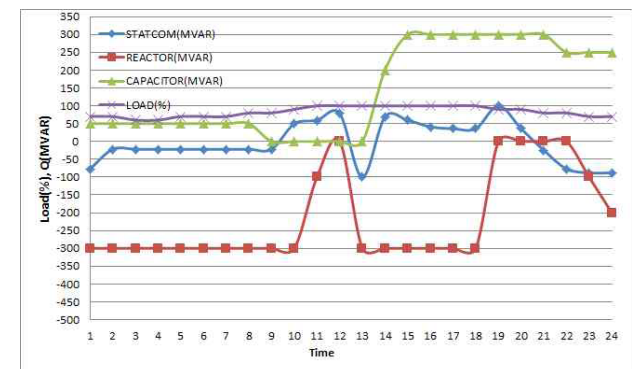


그림 4 비상상태 무효전력 제어결과

Fig. 4 Result values for Emergency reactive power control

그러나 그림5와 같이 전압제어가 기준 전압인 1.025p.u.와 허용 범위 0.005p.u. 기준으로 정확히 이루어지지 않는 사례도 확인 되었다. 신속한 제어에 목적을 두고 알고리즘을 설계해서, 정확도는 100%달성하지 못하였다. 신속성과 정확성을 갖춘 알고리즘 개발이 필요하게 되었다.

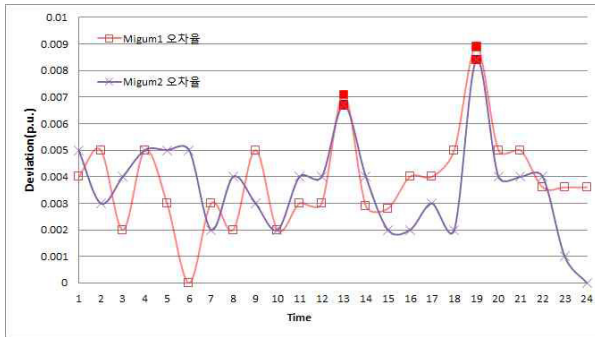


그림 5 비상상태 Multiple 전압 제어 오차율
Fig. 5 Result values for Multiple voltage control

표 2는 경부하에서 345KV 선로 사고시 Multiple알고리즘적용 결과이다. 현재 동작 가능한 설비는 STATCOM 68.22Mvar 이고 리액터 3대, 커패시터 6대이다. 탭은 설비 특성상 비상 상태시에는 동작하지 않도록 설정하였다. 사고 발생에서 가장 중요한 시간 관점에서는 기존 정상상태 알고리즘인 Back to Back 방식대비 경부하, 중부하 일 경우 각각 2/7, 1/4 시간만큼 빠르게 대응 한다는 결과가 도출되었다. 그러나 경부하, 중부하, 첨두부하 각각 허용범위를 벗어나는 오차가 발생하는 사례를 확인하였다

표 2 비상상태시 Multiple 전압제어 결과

Table 2 Result values of voltage control in Multiple

	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

3. Optimal 전압제어

전압 안정화를 위해 고려되어진 사항은 최소의 무효전력량 즉 전압보상설비 투입과 각 설비의 가중치로 투입 우선순위 선정이다. 비용 부분을 목적함수에 고려해 줌으로써 스위칭 횟수와 함께 결과값이 최소가 되도록 식을 성립했다. 제약변수는 최적해의 범위를 정해주기 위해 설비 투입가능 횟수와 전압에 따른 설비 투입량을 산정하도록 했다.

그러나 전력계통을 운영하는 입장에서 경제적인 운용을 위해 손실최소화만을 목적으로 운용할 수는 없다. 손실 최소화만을 목적으로 운용한다면, 경우에 따라 투입 가능한 설비인데도 최적해

로 나타나지 않는 경우가 발생하기도 하기 때문이다. 따라서 경제적인 운용을 위해 손실 최소화 목적도 중요하지만 전압 안정화가 이루어지는 조건하에서 최소의 설비투입과 상대적 투입순서가 고려되어야 할 것이다.

3.1 문제의 정식화

조상설비 투입 문제를 풀기 위하여 조상설비 투입 최소화를 목적함수로 선정한다. 또한 계통이 정상상태 및 상정사고를 고려한 상황에서 적절한운전범위를 만족해야 하므로 계통 운전조건을 만족하기 위한 모선 전압 및 기준전압 STATCOM 감도를 포함한다.

목적함수는 리액터(L), 커패시터(C), 탭(T)의 스위칭 상태와 갯수를 나타낸다. L0, C0, T0는 초기 스위칭 상태를 나타내며, CL, CC, CT는 각 설비들의 투입에 따른 상대적 비용문제로 목적함수의 가중치를 나타낸다.

binary integer를 이용해서 각 설비들의 적용 횟수를 제약 하였다. 각 설비들의 감도를 측정하여 전압 오차에 따른 투입량을 결정하였다. 최적화 알고리즘에서 이산변수를 직접적으로 다루지 않으므로 투입/차단되는 조상설비의 용량은 선형 변수로 적용하였다. 여기서 STATCOM은 초기 전압 제어에 영향을 주고 이후에는 조상설비들의 투입 차단에는 영향을 주지 않는 특성을 고려하여 제약변수를 설계하였다.

전압 안정화 범위 내에서 전압 보상설비 동작의 최소화라는 문제를 풀기 위해 최적화 기법은 분기한정법을 사용하였다.

$$\text{minf} = C_L \left\{ \sum_{i=1}^{5-L_0} iL_i + \sum_{i=1}^{L_0} iL_{(i+5-L_0)} \right\} + C_C \left\{ \sum_{j=1}^{6-C_0} jC_j + \sum_{j=1}^{C_0} jC_{(6-C_0+j)} \right\} + C_T \left\{ \sum_{k=1}^{17-T_0} kT_k + \sum_{k=1}^{T_0} kT_{(k+17-T_0)} \right\}$$

S.T.

$$\sum_{i=1}^5 L_i \leq 1 \quad L_i = 0 \text{ or } 1 \quad (i=1,2,3,4,5)$$

$$\sum_{j=1}^6 C_j \leq 1 \quad C_j = 0 \text{ or } 1 \quad (j=1,2,3,4,5,6)$$

$$\sum_{k=1}^{17} T_k \leq 1 \quad T_k = 0 \text{ or } 1 \quad (k=1,2,3,\dots,17)$$

$$V_{1s} - V_1^m - \Delta V_{1\text{statcom}} - \text{boundarg} \leq V_{1s} - V_1^m - \Delta V_{1\text{statcom}}$$

$$0.0042 \left\{ \sum_{i=1}^{5-L_0} iL_i - \sum_{i=1}^{L_0} iL_{(i+5-L_0)} \right\} + 0.0032 \left\{ \sum_{j=1}^{6-C_0} jC_j - \sum_{j=1}^{C_0} jC_{(6-C_0+j)} \right\} + 0.0008 \left\{ \sum_{k=1}^{17-T_0} kT_k - \sum_{k=1}^{T_0} kT_{(k+17-T_0)} \right\}$$

$$V_{2s} - V_2^m - \Delta V_{2\text{statcom}} - \text{boundarg} \leq V_{2s} - V_2^m - \Delta V_{2\text{statcom}}$$

$$0.0043 \left\{ \sum_{i=1}^{5-L_0} iL_i - \sum_{i=1}^{L_0} iL_{(i+5-L_0)} \right\} + 0.0052 \left\{ \sum_{j=1}^{6-C_0} jC_j - \sum_{j=1}^{C_0} jC_{(6-C_0+j)} \right\} + 0.0108 \left\{ \sum_{k=1}^{17-T_0} kT_k - \sum_{k=1}^{T_0} kT_{(k+17-T_0)} \right\}$$

전압 안정화 범위 내에서 전압 보상설비 동작의 최소화라는 문제를 풀기 위해 최적화 기법은 ILP를 사용하였다.

3.2 최적화 알고리즘

실제 프로그램 상에서 구현하기 위해 두가지 알고리즘을 제안한다. 목적함수/제약변수 형성 알고리즘과 입출력 알고리즘이다. 변전소의 초기조건에 따라 목적함수와 제약변수의 형태가 바뀌고

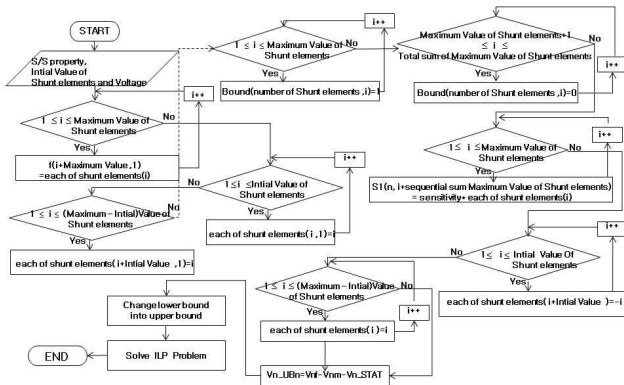


그림 6 목적함수/제약변수 형성 상세알고리즘
Fig. 6 Cofigulation detailed algorithm of O.F./S.T

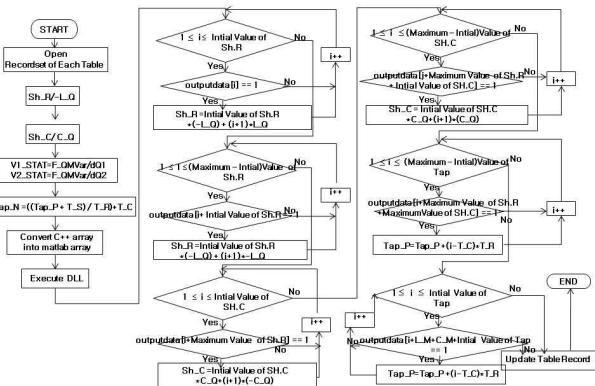


그림 7 입출력 전환 상세알고리즘
Fig. 7 Transferring detailed algorithm of input/output

시스템 연결을 통한 검증과정을 거치기 위해 알고리즘 개발이 선행되었다. 입출력 값은 PSS/E의 데이터 형식으로 만들었고 시스템화하여 검증하였다.

그림 7은 통신과정과 PSS/E data 변환과정을 나타낸다. 그림 7은 상세 알고리즘으로 PSS/E의 초기 데이터를 목적함수와 제약 변수의 입력값 형태로 변환 시켜주고 다시 그 최적해를 PSS/E의 데이터 형식에 맞게 변환시켜 주는 과정이다. 그림 8은 전체 최적화 수행과정이다.

4. 사례연구 및 시뮬레이션 결과

4.1 시스템 구성

실시간 전력계통해석 엔진의 개발을 위해 계통해석 프로그램으로 PSS/E를 이용 하였고, PSS/E Data를 통신 시켜주기 위해 Python 언어로 프로그램을 코딩 하였다. DB는SQL을 사용하였으며 최종적으로 계통해석을 시각화하고 제어 할 수는 HMI는 Intouch로 구현하였다. 마지막으로 최적화 기법을 이용해 목적함수를 풀기 위해서 Matlab의 DLL을 C++에 인클루드 시켰다. 이

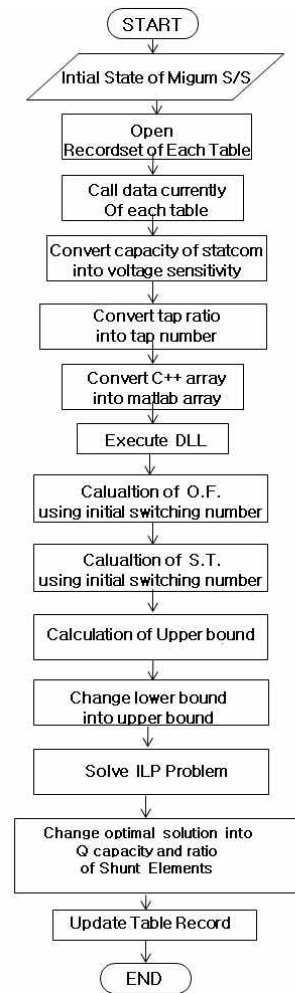


그림 8 전압제어의 최적운용 전체 알고리즘
Fig. 8 Overall algorithm for optimization operation of voltage control

를 DB와 링크시킴으로써 결과값을 PSS/E에서 조류계산하고 Intouch 화면으로 나타내주었다.

4.2 시뮬레이션 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.u으로 사고 상태에 도달하였다.

그림 11에서는 사고판단 후 가용 가능한 범위에서 STATCOM이 응답하였고, Shunt Reactor가 모두 투입된 Multiple 방식과 달리 제약변수의 범위안에서 최소의 스위칭 값이 산정되었다. Multiple 방식과 같은 속도로 전압제어가 가능하고 설비운용에

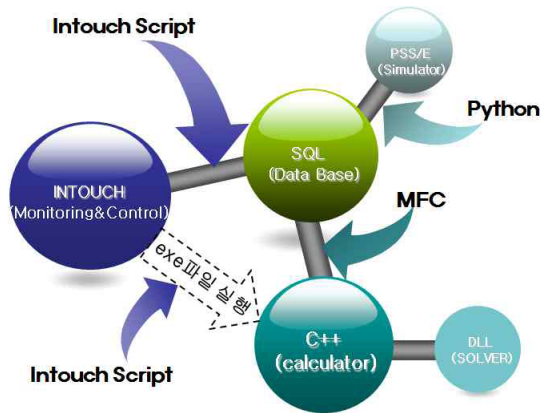


그림 9 최적화 시스템 모식도
Fig. 9 The schematic diagram of optimization system

계통 상형		변경 상형	
미그3(1차측 전압)	345KV #.#### [P.U]	1차측 기준전압	#.####
1차측 기준전압	345KV #.#### [P.U]	2차측 기준전압	#.####
미그1(2차측 전압)	154KV #.#### [P.U]	Boundary	#.####
2차측 기준전압	154KV #.#### [P.U]	Sh.R 최대갯수	#
STATCOM 현재용량	#### [MVar]	Sh.C 최대갯수	#
Sh.R 현재용량	#### [MVar]	운전 모드	수동
Sh.C 현재용량	#### [MVar]	STATCOM Q RESERVE	ON OFF
Tap 현재위치	#.####	초기값 상형	S L C T
계통 상형	정상 상태		
사고 상형	정동 ~ 미그3		

Config.	Type	Current Capacity (MVar)	Insert Number	Insert Capacity (MVar)	Input
1	STATCOM	####	####	####	V Set Point
2	Sh.R	####	##	####	Close Open
3	Sh.C	####	##	####	Close Open
4	OLTC	#.####	##	#	UP DOWN

그림 10 최적화시스템의 HMI
Fig. 10 HMI of optimization system

있어서는 최소 스위칭이 가능하다는 결과가 도출된다. 기준전압과 1,2 차측 전압의 격차를 산정해서 설비 감도를 적용해서 동시에 고려하는 최적화 기법이 기존 방식보다 불필요한 설비투입을 줄이기 때문에 생기는 결과이다. 방식(Back to Back 방식)과 달리 한 번에 전압제어가 이루어져서 비상상태시 대응이 가능하

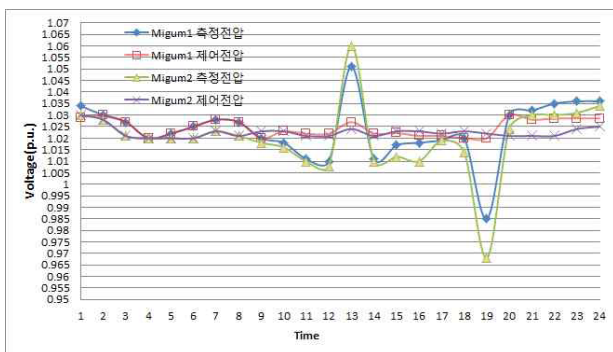


그림 11 비상상태 Optimal 전압 제어
Fig. 11 Result values for Optimal voltage control

였다.

그림 12은 비상상태시 무효전력 제어 결과 즉 전압보상설비의 스위칭 횟수를 나타낸다. 기준전압과 1,2 차측 전압의 격차를 산정해서 설비 감도를 적용해서 동시에 고려하는 최적화 기법이 기존 방식보다 불필요한 설비투입을 줄이기 때문에 Multiple 방식에 비해 스위칭 횟수를 줄일 수 있다.

전압 오차는 경부하, 중부하, 첨두부하 각각 허용범위를 벗어

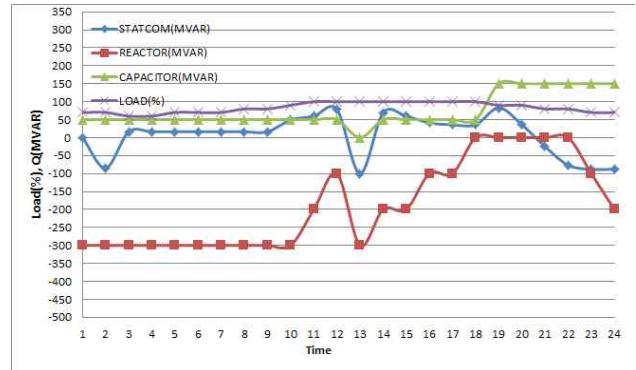


그림 12 비상상태 무효전력 제어결과
Fig. 12 Result values for Emergency reactive power control

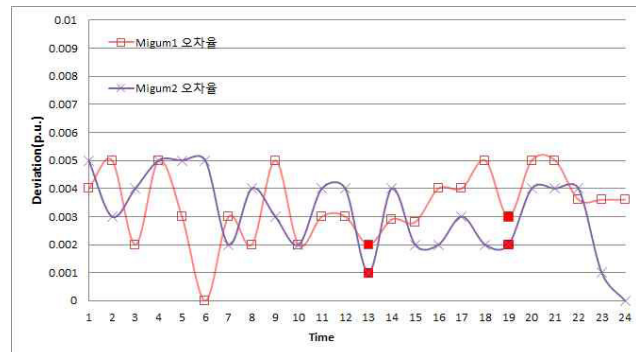


그림 13 비상상태 전압 제어 오차율
Fig. 13 Result values for Emergency voltage control

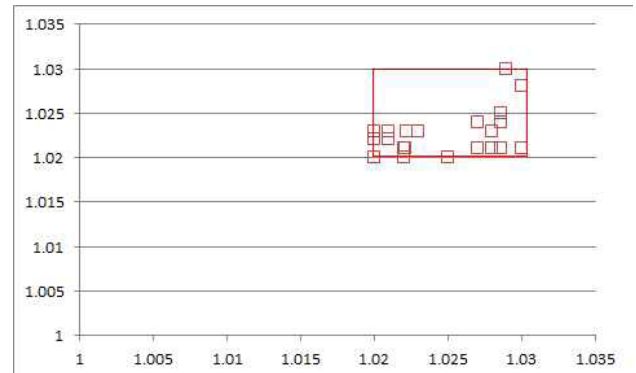


그림 14 Optimal 전압제어 결과
Fig. 14 Result values for Optimal voltage control

나는 오차가 발생하는 사례를 확인 한 Multiple 방식과는 달리 그림 14와 같이 기준전압 1.025p.u.에서 허용범위 0.005p.u.안으로 제어된다는 것을 확인 할 수 있다.

표 3은 부하에 따른 Multiple 방식과 Optimal 방식의 스위칭 횟수와 오차율을 비교한 것이다.

표 3 전압 안정화를 위한 스위칭 비교

Table 3 Result values of switching for stability

	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

	Multiple				
	L	C	Vset	time	error
경	3	5	1.0766	2/7	0
중	5	6	1.0882	1/4	0
피크	2	1	1.0506	1	0

5. 결 론

앞서 계통의 상태에 따라 두 가지 전압제어 방식을 제안했다. 정상상태에서의 Back-to-Back 방식은 전압보상설비들의 협조제어 측면에서는 효율적인 전압 제어가 가능하지만 각 설비들이 위치해 있는 지역만 고려 한다는 점에서 그 한계가 있다. 비상상태시의 Multiple 전압제어 알고리즘은 신속성은 있지만 투입 가능한 모든 설비들을 동작시킴으로써 정확한 전압제어가 이루어지지 못하고 설비투입에 따른 비용문제가 생긴다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해 최적화 기법을 도입하게 되었다.

전압안정화 기반에 전압 보상설비 최소 스위칭 횟수를 위해 목적함수를 모델링 하고 그해를 ILP로 도출하였다. 그 결과 조상설비 투입/차단 횟수가 줄어드는 것을 확인 할 수 있었고 이는 계통의 경제성을 실현 시킬 것이다. 이는 지역 전압안정화를 위해 FACTS와 조상설비 간의 협조 제어에 관한 새로운 시도이며 SCADA/EMS 방식의 변전소 운영을 고려한 실시간 최적화 시스템을 개발하여 실증했다는데 의의를 지니고 있다.

References

[1] Chang Han Ahn , Young Sik Baek , Ji Ho Park, and Geun Joon "Optimization for Minimum Switching Operation of STATCOM, External Bank, TapChanger using ILP," 16th International Conference on Electrical Engineering, July 11-14, 2010 Busan, Korea

[2] Chang-Han Ahn, Young-Sik Baek "Optimal Operation using ILP of Voltage Compensation Equipment for Voltage

Stability of Power System" 2011, Kyungpook National University, Thesis of Master's Degree

[3] S.T Cha and K.W Cho "A Real-Time Simulator for Power System Studies" 1998 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] Seung-Mook Baek, Suchul Nam, Jiyoung Song, Jaegul Lee, Taekyun Kim, Jeonghoon Shin, "Design of Advanced Voltage Management System Including Manual Operation Mode via Real-Time Digital Simulator," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, no. 4, pp. 1817-1826, July/August, 2013.

저 자 소 개



안 창 한(Chang-Han Ahn)

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

현재 동대학원 전자전기컴퓨터학부 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. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1977년 명지대 전기공학과 조교수.

현재 경북대 전자전기컴퓨터 학부교수.

Tel : (053) 950-5602

E-mail : ysbaek@knu.ac.kr