

변전소내 지역정보를 이용하여 안정도 향상을 위한 실시간 OLTC 및 커패시터 협조제어 알고리즘[†]

(On-line coordination control of OLTC and Switched Shunt for enhancement of stability using local data in substation)

강 상 균*
(Sang-Gyun Kang)

요 약 본 논문은 변전소 내에서 취득된 데이터만을 이용하여 전계통 전압안정도를 확보하기 위한 실시간 변전소내 OLTC(On-Load Tap Changer)와 S.S(Switched Shunt)와의 협조제어 알고리즘을 제안하고자 한다. 전압레벨을 일정한 값으로 유지시키기 위해서 동작하는 OLTC의 제어를 잘못하게 된다면 오히려 계통의 안정도(전압안정도)를 해치는 결과를 나타낼 수 있다. 이 논문에서는 단일 변전소에서 취득된 데이터만으로 전체 시스템의 상태를 판단할 수 있는 Z-index를 이용하였다. Z-index를 이용하여 시스템을 normal 상태와 abnormal 상태로 구분하였고, 각 상태에 따른 협조제어 알고리즘을 제안하였다. 알고리즘 검증을 위해서 Hypersim과 matlab simulink를 이용하였다.

핵심주제어 : 변전자동화, 변전소 협조제어, OLTC, Switched Shunt, PMU

Abstract This paper suggest the on-line coordination control between on-load tap changers and Switched Shunts for ensuring the voltage stability using local data obtained from one substation. Inappropriate control of on-load tap changers that are able to maintain voltage profile might cause unintended result that is harmful to system stability, especially voltage stability. This paper utilizes Z-index that could inform the whole system condition from only one substation data. Simulation is performed using the HYPERSIM that is a digital simulator and matlab simulink to confirm the proposed algorithm

Key Words : Substation Automation, Coordiantion Control in substation, OLTC, Switched Shunt, PMU

1. 서 론

최근의 전력계통은 경제적 문제와 환경적 문제 때

문에 송전용량 한계에 가깝게 운전되고 있다. 이는 계통의 안정도에 심각한 영향을 초래할 수 있다. 이러한 문제점 해결을 위해서 FACTS(Flexible AC Transmission Systems)나 S.C(Switched Capacitor)와 같은 기기들이 계통에 투입되기도 하고, 기존의 장비들을 이용하여 보다 효율적으로 전압-무효전력을 제

[†] 이 논문은 경일대학교 신입연구교원 정착연구비 지원에 의해 연구되었음.

* 경일대학교 철도전기공학부

어함으로써 계통이 안정하게 운영될 수 있도록 하기 위한 노력들이 많이 수행되어 왔다. [1][2] 수많은 기기들이 계통에 투입되고 계통이 점점 복잡해짐에 따라 변전소 운영자가 계통의 상태에 따라 Tap controller나 S.S(Switched Shunt) 제어를 하는데 어려움이 점점 더 커지고 있는 실정이다. 또한 소비자들은 양질의 전력 품질을 요구하고, PMU와 같은 장비의 보급과 통신 시설 확충 및 데이터 연산 속도의 증가는 변전소 자동화를 가속화하는 밑거름이 되었다.

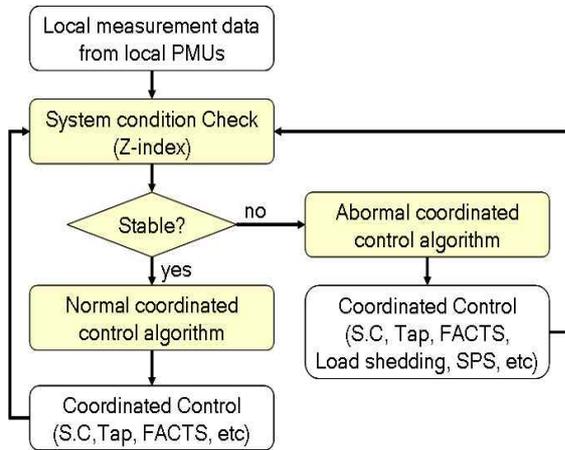
변전 자동화는 다양한 분야에서 활발히 이루어지고 있지만, 계통이 안정하게 운전될 수 있도록 실시간으로 계통을 감시하고 제어에 대한 자동화에 대한 연구가 무엇보다도 필요하다. 특히 부하에 안정적으로 전력을 공급해주기 위해서는 전압-무효전력 제어의 중요하다. 전압-무효전력은 지역적 특성을 가지고 있기 때문에 변전소 환경에서의 전압 제어를 통해 일반적으로 계통의 안정성을 유지할 수 있다. 하지만 계통이 abnormal한 상태, 즉 송전용량 한계에 가깝게 운전되고 있을 때는 변전소에서의 전압 제어만으로 운전하는 경우 더 이상 지역적인 문제가 아닌 계통의 전체적인 붕괴를 야기시킨다. 따라서, 전압안정도 측면에서 변전 자동화를 위해서는 계통이 normal상태인지, 아니면 abnormal 상태인지를 판단을 하고 이에 따른 전압-무효전력 제어 방안이 필요하게 된다. 계통 상태의 안정도여부를 판단을 위해서 실시간 계통 안정도 지수가 필요하고, 이에 따른 운전 전략 수립이 요구된다. 본 논문에서는 단일 변전소내 PMU(Phasor Measurement Unit)를 통해 얻을 수 있는 실시간 취득 data를 이용하여 계통의 상태를 파악하고, normal한 경우와 abnormal한 경우에 대하여 각각 제어 운전 전략을 수립하고자 한다. 실시간 전압안정도 판단을 위해서는 빠른 시간 내에 안정도를 판별할 수 있어야 하기 때문에, off-line에서 해석되는 PV 해석 알고리즘을 이용하기에는 여러 제약이 있다. 본 논문에서는 Z-index를 이용하여 계통 상태를 abnormal 상태와 normal 상태로 나누고, abnormal 상태에서는 계통 붕괴를 최소화시키기 위한 제어방안을, normal 상태에서는 전압 profile 향상을 위한 효율적인 제어 방안을 도출하고자 한다.

abnormal 상태에서 OLTC의 동작은 부하측에서의 전압 profile에는 도움을 주지만 결국 계통의 운전점을 점점 전압불안정점으로 이동시키기 때문에, tap을

blocking 시킴으로써 OLTC 동작에 의한 전압붕괴를 방지할 수 있다. normal 상태에서의 주요 제어 목적은 전압 profile을 향상시키는 것이다. 일반적으로 변전소 내에는 전압 유지를 위해 제어할 수 있는 device로 변압기의 tap과 switched shunt가 있다. (일부 모션에서는 shunt-type FACTS 기기도 있다) 만일 전압이 기준전압에서 벗어난 경우 tap과 S.C가 서로 동작하게 되는데, 이 장비들의 동작은 서로 다른 장비의 동작 조건을 변화시킨다. 따라서, 협조운전을 하지 않는다면 voltage hunting 현상이 발생할 수 있기 때문에 협조 운전전략이 필요하다. 본 논문에서는 제안된 알고리즘 검증에 위해 디지털 시뮬레이터인 HYPERSIM을 이용하였다.

2. 지역정보를 이용한 변전소내 협조운전 알고리즘

이 논문에서는 단일 변전소내의 PMU에서 얻을 수 있는 계통 정보를 이용하여 전압-무효전력을 효율적으로 제어하기 위해 변전소내 설치되어 있는 device의 제어 알고리즘을 도출하고자 한다. 전체적인 제어 알고리즘은 <그림 1>과 같다. 변전소 내의 PMU로부터 획득한 data를 바탕으로 계통의 상태를 파악하고 시스템이 안정한 경우 normal 상태에서의 협조 제어 방안 알고리즘을 수행하고, 시스템이 불안정한 경우 abnormal 상태에서의 협조 제어 알고리즘을 수행한다. 여기에서 normal 상태는 계통에 작은 외란이 발생하는 경우를 말하고, abnormal 상태는 계통의 안정도에 큰 영향을 미치는 외란이 발생하는 경우를 말한다. 본 논문에서는 <그림 1>에서와 같이 3가지 알고리즘에 대하여 알아보하고자 한다.



<그림 1> 변전소내 협조제어 알고리즘

2.1 시스템 상태 판단 알고리즘

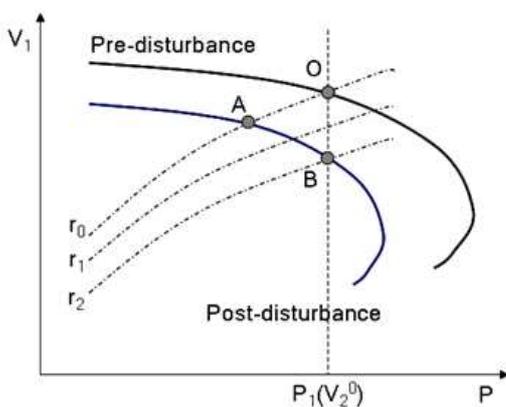
본 논문에서는 계통의 안정도 평가 지수로 Z-index를 선정하였고, 이를 계산하기 위해 RLS(Recursive Least Square) 방법을 적용하였다. RLS의 가장 중요한 특징 중의 하나는 바로 역행렬 계산시 matrix의 size가 2×2로, LS (Least Square) 방법 적용시의 4×4보다 작기 때문에 연산속도 측면에서 빠르다는 점이다. 또한 LS방법에서는, parameter estimation을 계산하기 위해 필요한 데이터를 저장하기 위해서는 moving data window를 저장해야할 메모리가 대신 RLS 방법에서는 단지 forgetting factor $\lambda(0 \leq \lambda \leq 1)$ 를 선정함으로써 위의 문제를 해결할 수 있다. 위의 특징

들은 RLS 방법이 실시간 안정도 평가지수로 이용하기에 보다 더 적합함을 보여준다. RLS를 이용하여 실시간으로 Z-index를 계산하고 이를 통해 계통의 상태를 판단한다. 만일 계통이 안정하다고 판단되면 normal coordination 알고리즘을 적용하고, 불안정하다고 판단되면 abnormal coordination 알고리즘을 적용한다.

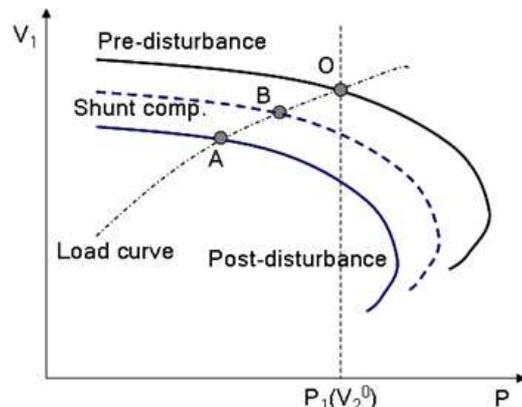
2.2 Normal coordination 알고리즘

Normal 상태에서의 전압-무효전력 제어 목적은 계통의 전압을 효율적으로 제어하는 것이다. OLTC는 변전소의 전압에 영향을 미치고, S.S는 변전소의 무효전력에 영향을 미치기 때문에, 한 기기의 동작은 다른 장비의 제어에 영향을 미친다. 즉, 계통에 외란의 발생으로 전압이 떨어지는 경우 OLTC는 tap을 조정함으로써 전압을 높이고, S.S는 무효전력을 공급함으로써 전압을 높일 수 있다. 두 기기가 모두 동작하는 경우 오히려 과전압 현상이 발생할 수도 있고, 이는 결국 불필요한 제어동작을 야기시키게 된다.

<그림 2>에서 (a)는 외란 발생이후 OLTC 동작에 따른 계통의 변화를 SV 평면에서 분석한 그림이다. r_0, r_1, r_2 는 tap 위치에 따른 부하의 특성곡선이다. SV 평면에서 y축은 1차측(시스템 쪽)의 전압이고, x축은 계통의 stress(ex, load demands)이다. 사고 이전 "O"에서 운전하고 있다가 사고 발생시 "A"에서 운전점이 이동한다. V_2 의 전압이 기준전압보다 낮은 경우 V_2 를 높이기 위해서 tap이 동작하게 되고 부하 curve



(a) OLTC 제어 이후 PV 곡선



(b) S.C 제어 이후 PV 곡선

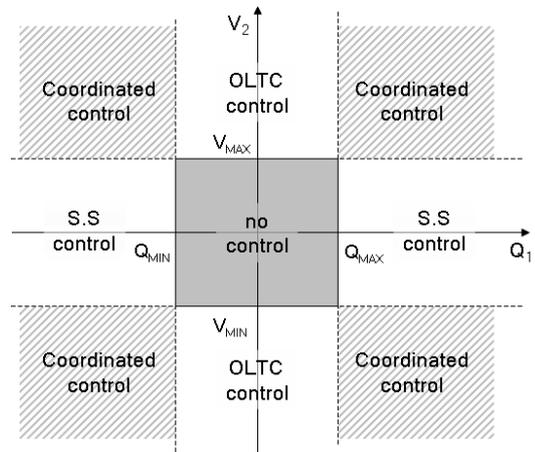
<그림 2> S.C, OLTC 제어에 따른 PV곡선

는 r_0 에서 r_1 , r_1 에서 r_2 로 이동하고, 결국 B에서 새로운 운전점을 갖게 될 것이다. 이 과정에서 V_2 는 임계값 범위안으로 회복되고, 이와 더불어 PI도 회복되지만, 시스템 쪽의 전압은 떨어지게 됨을 알 수 있다. 즉, tap controller는 2차 측의 voltage profile을 향상시키지만, 시스템 측의 전압 특성은 오히려 악화시킬 수도 있다. 이 경우에는 <그림 2>의 (b)와 같이 S.C를 동작시켜 시스템 측의 전압을 보상해주는 것이 효과적이다. <그림 2>의 (b)는 사고 이전 운전점이 "O"에서 운전하고 있다가 계통에 외란이 발생한 이후 "A" 점으로 운전점이 이동한 경우를 보여준다. 이때 S.C가 투입되거나 S.R이 제거 되는 순간 운전점이 "B" 점으로 이동하고, 사고 이전 상태로 돌아갈 수 있을 만큼 충분한 무효전력이 공급된다면 "O"점으로 운전점이 이동하게 될 것이다. S.C는 OLTC와 달리 시스템의 전압을 보상해주는 효과가 있음을 알 수 있다. 즉, 계통의 사고로 인하여 부하단에서 요구되는 무효전력량이 커지면 계통 쪽에서 들어오는 무효전력의 유입량이 증가하고, 이는 계통의 전압 특성을 취약하게 할 수 있기 때문에 2차측에서 증가하는 무효전력의 유입량만큼 보상을 해준다면 시스템의 전압은 유지될 수 있다. 따라서, S.S를 제어하기 위한 모니터링 대상은 무효전력량(Q_1)을 기준으로 하였다.

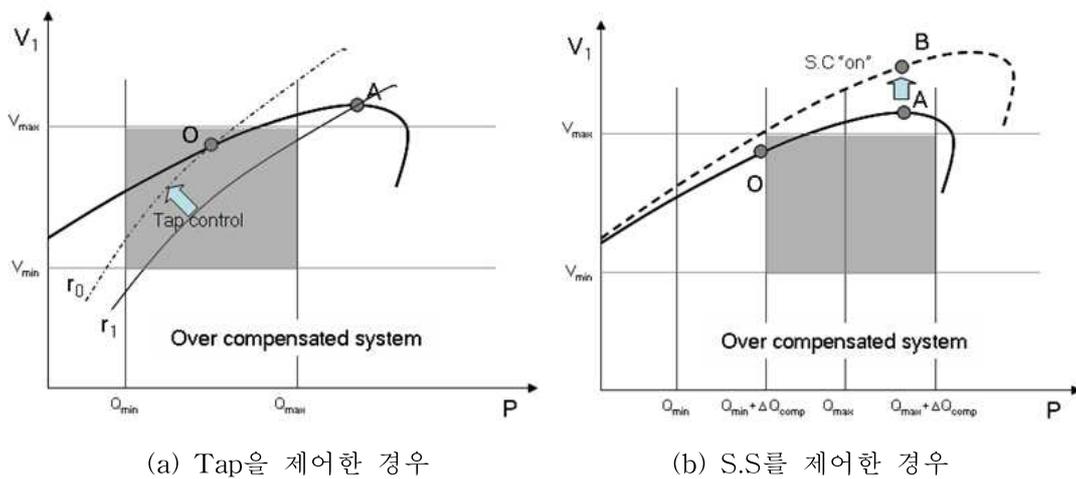
위에서 언급했듯이, OLTC는 V_2 의 전압을 모니터링하다가 threshold 값을 넘는 경우 동작을 하고, S.S는 1차측에서 유입되는 Q량을 모니터링하다가 threshold 값을 넘는 경우 동작을 시킨다. 이에 대한 협조제어 평면은 <그림 3>과 같다. <그림 3>에서 가운데 음영

부분은 계통이 정상적인 운전범위 내에 있음을 의미하고, 이때는 아무런 제어동작을 취하지 않는다. <그림 3>에서 빗금친 부분은 OLTC가 동작할 수도 있고, S.S가 동작할 수도 있는 영역으로 불필요한 제어동작을 줄이고 효율적인 계통 운영을 위해서 협조제어가 필요한 영역이라고 할 수 있다.

<그림 3>에서 1/4평면의 coordinated control 부분은 외란 발생시 Q_1 이 증가하면서 V_2 가 높아지는 경우로 계통이 과보상된 상태이다. <그림 4>, <그림 5>에서 V_{max} , V_{min} 은 1차측 전압의 최대 최소 임계 전압을 나타내고, Q_{max} , Q_{min} 은 1차측에서 2차측으로 유입되어 들어가는 Q의 임계값을 나타내고, "O", "A", "B"는 각각 사고이전의 운전상태, 사고이후의 운전상태, 제어 이후의 운전상태를 말한다. <그림 4(b)>와



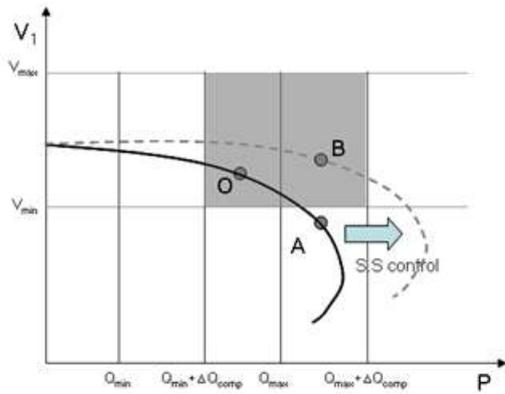
<그림 3> 변전소내 협조제어 평면



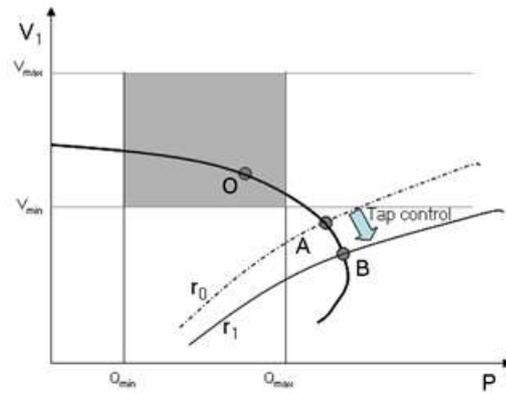
(a) Tap을 제어한 경우

(b) S.S를 제어한 경우

<그림 4> 과보상된 시스템에서 제어 결과



(a) S.C를 제어한 경우



(b) tap을 제어한 경우

<그림 5> Normal 시스템에서 제어 결과

같이 S.C가 동작하면 과전압 현상이 더욱 심각하게 되기 때문에 안전 영역으로 돌아올 수 있게 하기 위해서 tap을 제어해야 한다.

<그림 3>의 4/4평면은 외란 발생시 Q1이 증가하고 V2가 감소하는 경우로 normal system이 이와 같은 특성을 갖는다.

<그림 5(b)>에서와 같이 tap을 제어하는 경우는 운전점이 dead-band영역에서 벗어나는 현상을 더욱 가속화시키기 때문에 S.S를 제어하는 해야 한다.

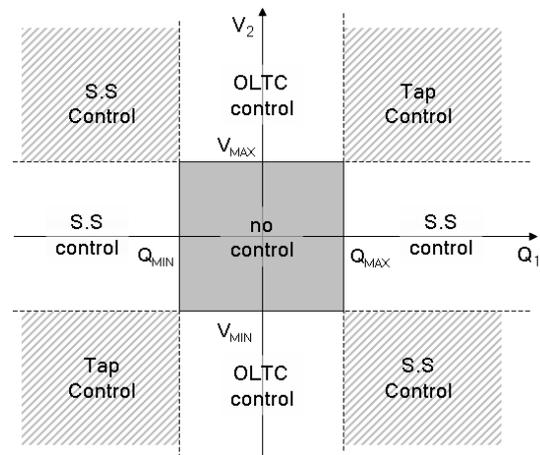
마찬가지로 <그림 3>의 2/4평면, 3/4평면에 대해서 적용하면, 결국 협조제어 평면 결과는 <그림 6>과 같이 생각할 수 있다.

2.3 Abnormal coordination 알고리즘

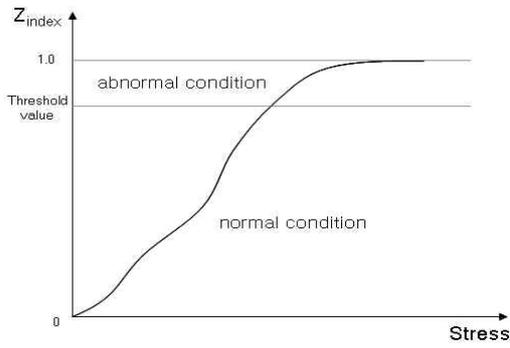
위 2.1 에서 계통상태를 판단하는 알고리즘을 적용하여 계통이 emergency 상태시 Normal coordination 알고리즘을 적용하면 대정전이 발생할 수 있다. 따라서 이와 같은 경우에는 부하차단이나, tap blocking, tap reversing과 같이 특별한 제어 동작을 수행하면 된다. 본 논문에서는 실시간 안정도 지수로 Z-index를 이용하였다. Z-index는 0에서 1사이의 값을 갖고, 1에 가까울수록 불안정에 가까워진다. <그림 7>과 같이 Z-index가 일정 값 이상이 되면 계통이 emergency 상태라고 판단하고, 비정상시 운전 제어를 적용하고자 한다. <그림 7>에서 threshold value는 마진을 고려한 Z-index 값이라고 할 수 있다.

3. 사례 연구

사례연구는 Hydroqubec 시스템을 대상으로 수행하였고, 모의 톨은 Hypersim과 matlab에서 제공하는 simulink를 이용하였다. 전체적인 모의는 Hypersim에서 수행하고, simulink는 협조제어 알고리즘을 설계하기 위해서 이용하였다. Hydroqubec 시스템은 북쪽에 수력발전기가 밀집되어 있고 남쪽에 부하가 밀집되어 있는 특징을 갖기 때문에 대용량 장거리 송전에 따른 전압안정도 문제를 안고 있다.



<그림 6> 변전소내 협조제어 알고리즘



<그림 7> Z-index에 따른 계통 상태 구분

부하가 연결된 변전소에 Z-index를 계산 OLTC와 S.C의 협조제어기를 설계하였다. simulink로 구현된 협조제어 알고리즘은 <그림 8>과 같다.

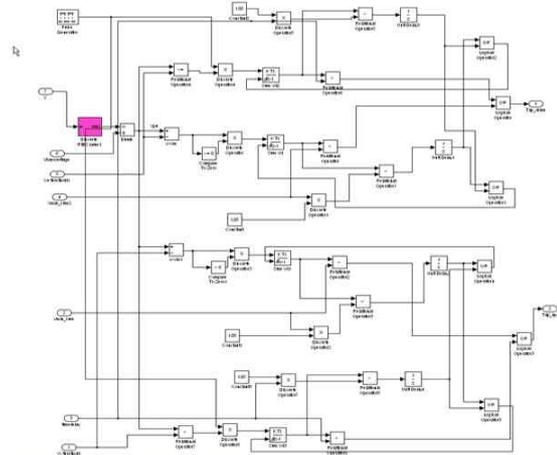
Normal 상태에서 알고리즘 검증을 위해 다음과 같은 시나리오를 적용하였다.

- 5초에 부하모선에 400MW, 400MVar 증가
- 15초에 600MVar 추가 증가

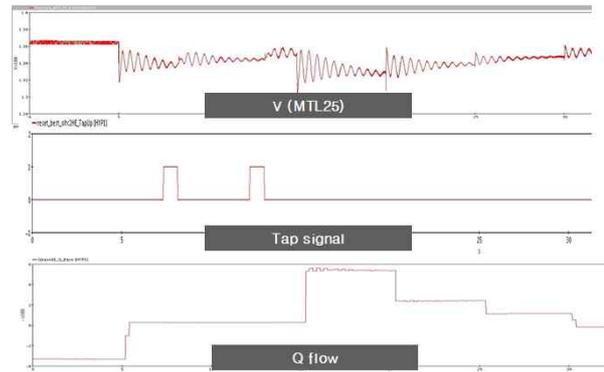
시뮬레이션 결과는 <그림 9>과 같다. <그림 9>에서 위 그래프는 변전소의 전압이고, 가운데 그래프는 tap signal, 제일 아래 그래프는 Q flow를 나타낸다. 처음 5초에 부하모선에 P, Q 증가로 인해 전압이 감소하였는데, 이는 OLTC의 동작만으로 충분히 전압이 회복이 가능하기 때문에 tap만 동작하였다. 이후 15초에 600MVar 증가시 변전소내 무효전력 문제 야기되 더 이상 OLTC만으로 전압안정화가 힘들기 때문에 S.C가 투입이 되었고 이에 따라서 Q flow가 감소하면서 전압이 회복되는 현상을 보여준다.

abnormal 상태에서 알고리즘 검증을 위해 다음과 같은 시나리오를 적용하였다.

- 15초에 인근 지역 선로사고 (MTL25-QUE25)
- 이에 대한 Z-index의 변화 및 시뮬레이션 결과는 <그림 10>, <그림 11>와 같다.

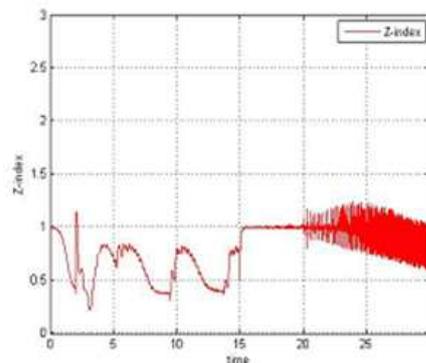


<그림 8> Normal 상태 협조제어 알고리즘

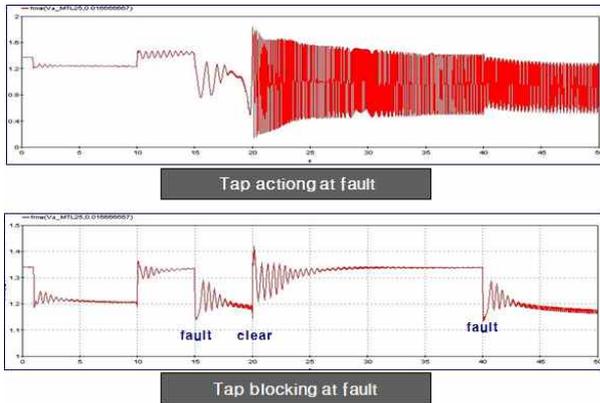


<그림 9> normal 상태 협조제어 결과

<그림 10>에서 15초에 사고발생으로 Z-index가 1에 도달하였고, 이 경우 abnormal 협조제어를 수행해야 한다. <그림 11>에서 위 그래프는 normal 협조제어 알고리즘을 적용한 결과이고, 아래 그래프는



<그림 10> Z-index 결과



<그림 11> abnormal 상태 협조제어 결과

abnormal 협조제어 알고리즘을 적용한 결과이다

<그림 11>에서 보는 바와 같이 abnormal 상태에서 normal 협조제어 알고리즘을 적용하면 계통이 붕괴됨(20초)을 확인 할 수 있다. 하지만 abnormal로 인식하여 전압이 떨어진다고 하더라도 tap을 동작시키지 않고 block하는 경우 계통이 붕괴하지 않음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 단일 변전소에서 제공하는 정보만을 이용하여 전 계통의 전압안정도를 판단하기 위하여 Z-index를 도입하였고, Z-index의 값에 따라서 계통을 normal 상태, abnormal 상태로 구분하였다. normal 상태에서 변전소의 효율적인 전압 제어를 위해 OLTC와 S.S의 협조제어 알고리즘을 제안하였고, abnormal 상태에서는 변전소의 전압제어가 아닌 계통의 붕괴를 막기 위해 tap을 block하거나 reverse하는 제어 알고리즘을 제안하였다. 이에 대한 사례연구로 Hydroqubec 시스템에서 각 상태에 따른 모의 결과를 Hypersim과 simulink를 이용하여 구현하였다. 변전자동화의 완성도를 높이기 위해서는 향후 OLTC, S.S 뿐만 아니라 변전소내 전압안정도 향상을 위해 설치된 FACTS 및 부하차단 시나리오와의 협조제어도 고려한 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] Hingorani, N. G., “FACTS:Flexible AC Transmission Systems” EPRI conference on Flexible AC Transmission system, Cincinnati, OH, Nov, 1990
- [2] P. Kundur, “Power System Stability and Control”, New York: McGraw-Hill, 1994
- [3] C. Taylor, “Power System Voltage Stability”. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [4] 유성은, “센서네트워크 동작 및 센싱 알고리즘 검증을 위한 소프트웨어 프레임워크”, 한국산업정보학회 논문지, 제17권, 제1호, 2012.
- [5] 유기동, 황현석, “온톨로지를 이용한 프로세스 기반 지식지도 구축”, 한국산업정보학회 논문지, 제 17권, 제4호, 2012.



강 상 균 (Sang-Gyun Kang)

- 고려대학교 전기전자전파공학부 공학학사
- 고려대학교 전기공학과 공학석사
- 고려대학교 전기학과 공학박사
- 경일대학교 IT융복합대학 철도전기공학부 조교수
- 관심분야 : 전력시스템 안정도, 신재생 에너지