

Switched Shunt의 무효전력 민감도를 이용한 조류계산 수렴성 개선

논 문
61-3-1

Improvement of the Power Flow Convergency Using Switched Shunt Reactive Power Sensitivity

오 성 균* · 양 민 욱** · 김 건 중†

(Sung-Kyun Oh · Min-Yuk Yang · Kern-Joong Kim)

Abstract - It is difficult to converge power flow for the power system planning data. The main cause of power flow diverse is reactive power imbalance. A active power could be adjust by ELD or merit order but a reactive power couldn't dispatch before power flow analysis. The lack of reactive power of power system is cause a inadequate voltage drop This paper suggest new reactive power dispatch algorithm using switched shunt admittance. This algorithm uses reactive power sensitivity called switch shunt jacobian. When proposed algorithm applies to real system data that couldn't be conversed in PSS/E the power flow analysis is converged.

Key Words : Power flow, Reactive power, Switched shunt, Sensitivity

1. 서 론

전력계통 입력데이터는 전력계통 송전계획을 세우는데 있어서 가장 기본적이고 중요한 데이터이다. 일반적으로 전력계통 계획 데이터는 현재 운영실적 데이터에 검토를 수행하고자 하는 시점의 설비 신설/폐기 정보와 그 시점의 예측부하량을 반영하여 만든다. 이 때 예측부하량 중 유효전력은 일정한 규칙에 따라 각 발전기에 할당해 수급균형을 맞출 수 있다. 그런데 문제는 무효전력 배분이다. 부하에 필요한 무효전력량은 알 수 있지만 이를 공급하기 위한 공급원을 명시적으로 배정할 수 없다. 발전기의 무효전력은 조류계산 결과에 따라 달라지며, 또 다른 무효전력 공급원인 switched Shunt는 실제 공급되는 무효전력량은 연결모선의 전압에 따라 달라지므로 투입량만을 알 수 있다[1][2].

이 무효전력 배분이 잘못 되었을 경우 조류계산이 발산되거나 저전압 현상이 발생하여 계획데이터 사용할 수 없다. 그러한 이유는 조류계산 기법에서 찾을 수 있다. 기존의 일반적인 조류계산은 switch shunt와 무효전력 제어요소를 제어대상 모선의 전압을 기준으로 투입/제거 되었다. 그러나 이러한 조류계산 방식은 계통의 작은 변경에 대해서는 유효하지만 계획데이터와 같이 계통구성과 부하량이 크게 변경된 계통에 대해서는 무효전력 수급불균형으로 인해 수렴되지 않을 가능성이 높다. 일반적인 조류계산 방법에서는 조류계산 반복을 몇 회 수행한 후에 전압제어범위에 따라

switch shunt의 투입량과 변압기의 탭비를 조절하게 된다. 그런데 switch shunt의 투입방법은 전압 제어범위에 따라 단계적으로 Bank를 투입하거나 빼는 방식으로 진행되는데, 이는 초기투입량이 현저하게 잘못된 경우에는 전압제어 보다는 조류계산 수렴이 우선이다.

이러한 switch shunt에 대한 제어방법은 몇 회 반복계산 중 이미 저전압현상이 발생하여 전압붕괴가 진행된 상태에서는 의미가 없다. 무효전력은 전압의 크기에 직접적인 영향을 미치는데, 특정모선에 무효전력이 부족하게 되면 해당 모선에서 저전압 현상이 발생하게 된다. 일반적인 조류계산 방법은 계통의 미소한 변화에 대해서 조류와 전압을 파악하는데 유용하지만, 계통 계획과 같은 큰 부하량 변동이 큰 계통변화에 대해서는 적합하지 않다.

본 논문에서는 계통계획시와 같이 무효전력 배분이 크게 변경될 경우에 조류계산 발산가능성이 높는데 이를 해결하기 위한 방법으로 switch shunt의 투입량을 전압과 투입량과의 감도행렬을 이용하여 결정하는 알고리즘을 제시하였다. 조류계산 반복계산 중 switch shunt가 설치된 모선에서의 무효전력 오차를 지표로 하여 필요한 투입용량을 계산하여 투입하는 방식이다. 위와 같은 방법으로 switch shunt제어를 수행했을 때 무효전력 수급불균형으로 수렴되지 않던 계통이 수렴되는 결과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 조류계산시 해의 탐색

조류계산의 결과인 전압의 크기와 위상각은 초기값에서 시작하여 계통의 해 영역 안에 들어가는 과정으로 묘사할 수 있다. 이를 그림으로 표시하면 다음 그림 1과 같다.

* 정 회 원 : 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정
 ** 정 회 원 : 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정
 † 교신저자, 펠로우회원 : 충남대학교 공대 전기공학과 교수
 E-mail : kjkim@cnu.ac.kr
 접수일자 : 2011년 11월 3일
 최종완료 : 2012년 2월 6일

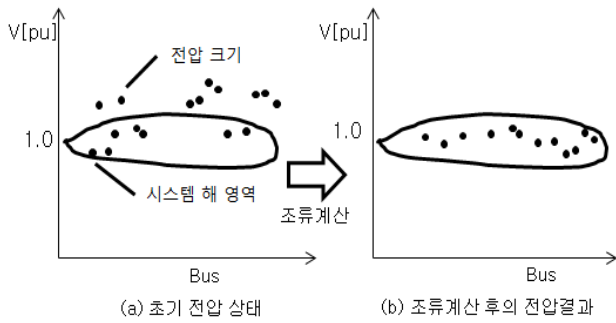


그림 1 제어요소가 동작하지 않았을 때의 조류계산 과정
Fig. 1 Power flow process without control element

만약 무효전력 공급이 수요량과 맞지 않는다면 전압을 불안정해지거나 발산할 수 있다. 이러한 경우를 다음 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2(a)와 같이 주어진 계통상태에 대한 조류계산 해가 infeasible 영역에 위치한다면 해를 구할 수 없게 된다. 시스템 해는 설비 구성과 같은 물리적인 요소에 영향을 받기 때문에 전력계통의 설비상태를 변경하면 해의 영역이 변경된다. 이 때, 무효전력 설비 등을 조정하여 조류계산의 해의 영역을 그림 2(b)와 같이 변경한다면 해를 구할 수 있다.

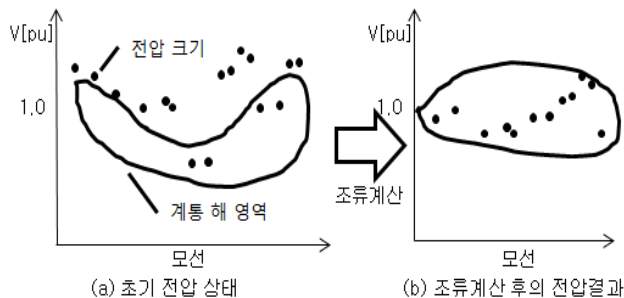


그림 2 제어요소가 동작 했을 때의 조류계산 과정
Fig. 2 Power flow with control elements

장기 계획 데이터와 같이 원본 데이터와 비교했을 때, 전체 계통의 수요가 급격하게 달라졌을 경우 또는 부하패턴이 심하게 달라졌을 경우에 조류계산이 수렴하지 않는 원인의 대부분은 무효전력의 수급 불균형에 있다. 본 논문은 이 무효전력 공급량을 제어함으로써 수렴하지 않던 조류계산이 수렴할 수 있도록 하는데 있다.

일반적인 조류계산에서의 switch shunt는 제어대상 모선의 전압을 기준으로 설비 투입량을 조정하였다. 이를 그림으로 나타내면 다음 그림 3과 같다. 전압제어 모선의 전압을 체크하여 모선전압이 상한값을 넘으면 캐패시턴스를 한단계 낮추고, 하한값보다 낮으면 캐패시턴스를 한단계 투입하는 방식이다[3].

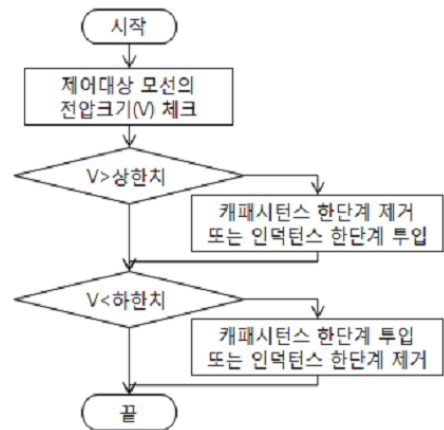


그림 3 기존의 Switch shunt 투입방식
Fig. 3 Previous switch shunt activity

그러나 이러한 제어방식은 현재 계통상태에 대한 조류계산의 해가 feasible 영역에 위치할 때에 유효하다. 만약 계통상태에 대한 조류계산 해가 infeasible 영역에 있을 때는 이러한 방식은 어느 정도의 무효전력을 공급하여야 할지 계산하지 않기 때문에 해당 무효전력 공급설비를 1뱅크씩 단계적으로 조정하는 방식을 취하였다. 이러한 방식에 의한 무효전력 조정량은 무효전력 편차(mismatch)를 줄이기엔 부족하기 때문에 전압을 조정하기 전에 조류계산 중간결과는 이미 infeasible 영역으로 진입한다. switch shunt 투입량을 적절히 하기 위해 조류계산 오차가 일정범위 안에 들어온 후에 전압제어를 수행하는 경우도 있는데 이러한 경우 switch shunt설비 자체가 전혀 동작하지 않을 수 있다. 따라서 이러한 제어방식은 조류계산 수렴에 도움이 되지 않는다.

본 논문에서는 무효전력 설비의 전압 제어모션에서 무효전력 편차를 이용하여 적절한 투입량을 산정하는 방식을 도입하였다. 이를 통하여 보다 조류계산 수렴에 효과적이고 충분한 무효전력 공급 필요량을 계산할 수 있었다.

2.2 조류계산 수식의 변형

일반적으로 전력계통 조류계산을 위한 전력수급 방정식은 다음 식(1)과 같이 각 모선전압의 함수로 나타낼 수 있다[1].

$$S(\dot{V}) = 0 \tag{1}$$

여기서,

\dot{V} : 모선전압

식(1)에서 switch shunt의 투입량을 제어하는 경우에는 switch shunt의 투입량 B 를 독립변수로 고려하여 표현하면 다음 식(2)와 같이 2개의 변수의 함수로 볼 수 있다.

$$S(\dot{V}, B) = 0 \tag{2}$$

여기서,

$$\mathbf{B} = [B_1 \quad B_2 \quad \dots \quad B_s]^T$$

B_i : i 번째 Switched Shunt 투입량

위 식(2)를 각 변수에 대해서 Taylor 전개하면 식(3)과 같다.

$$\Delta \mathcal{S}(\dot{V}, \mathbf{B}) = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \dot{V}} \Delta \dot{V} + \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \mathbf{B}} \Delta \mathbf{B} \quad (3)$$

그런데 Switched shunt의 투입량은 무효전력에만 영향을 미치므로 다음 식(4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta \mathcal{S}(\dot{V}, \mathbf{B}) = \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial \dot{V}} \Delta \dot{V} + \frac{\partial Q}{\partial \mathbf{B}} \Delta \mathbf{B} \quad (4)$$

유효전력에 대한 수급이 어느 정도 맞은 상태에서도 만약 전압값 갱신만으로 해를 찾을 수 없다면(즉, 해가 infeasible 영역에 위치하는 경우) 이는 무효전력의 불균형 때문일 것이다. 따라서 계통의 switched shunt 투입량 \mathbf{B} 를 변경함으로써 무효전력에 대한 수급을 맞춘다면 조류계산의 수렴성은 크게 개선될 것이다. 이 때, \mathbf{B} 를 적절히 변경하기 위해 Switched shunt 투입량에 대한 무효전력의 민감도 지표가 필요하다. 본 논문에서는 이 지표로서 switched shunt 민감도(자코비안) 행렬을 개발하였다.

2.3 Switched Shunt 민감도 행렬

일반적인 switched shunt에 대한 조류계산 모델을 다음 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

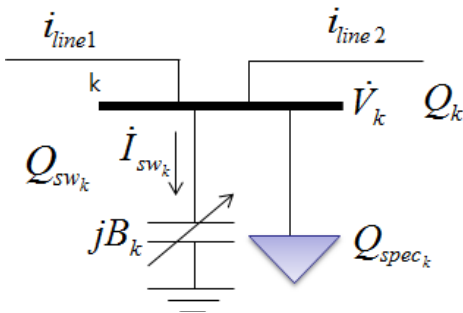


그림 4 Switch Shunt.조류계산 모델
Fig. 4 Switch shunt power flow model

모선 k 에서의 전류, 무효전력, 민감도는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\dot{I}_{sw_k} = jB_k \dot{V}_k \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q_{sw_k} &= \dot{V}_k \dot{I}_{sw_k}^* \\ &= -jB_k \dot{V}_k \dot{V}_k^* \\ &= -jB_k |V_k|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$J_{B_k} = \frac{\partial Q_{sw_k}}{\partial B_k} = |V_k|^2 \quad (7)$$

여기서,

\dot{I}_{sw_k} : k 모선에 연결된 switched shunt에 흐르는 전류

jB_k : k 모선에 연결된 switched shunt의 투입량

Q_k : k 모선에서의 무효전력

J_{Bk} : k 모선에서의 투입량에 대한 무효전력의 민감도

이 때, 전체 계통의 switch shunt 투입량에 대한 무효전력 민감도 행렬 J_B 의 크기는 $n \times s$ 이다. 전체 계통의 switched shunt 투입량에 대한 무효전력 편차의 관계는 다음 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[J_B] \Delta \mathbf{B} = \Delta \mathbf{Q} \quad (8)$$

즉,

$$\begin{bmatrix} J_{11} & & & & & \\ & J_{22} & & & & \\ & & & & & \\ & & & J_{43} & & \\ & & & & & J_{ns} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \vdots \\ \Delta B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서,

n : 모선수

s : switched shunts수

모선에 연결된 부하의 무효전력 용량이 Q_{spec_k} 이고, 모선으로 유입되는 전류를 i_{line1} , i_{line2} 라 하고, 모선의 전압을 \dot{V}_k , 계산된 무효전력량은 Q_{calc_k} 라고 했을 때, 이상의 과정을 정리하면 다음 그림 5와 같다.

switch shunt설비에서 모선에 공급하는 무효전력과 모선에서의 전압과 전류로부터 계산된 무효전력량과의 차이를 편차로 보고 이를 개선하기 위한 수정분을 계산한다. 계산된 수정분을 해당 설비에 반영할 경우 현재 설비용량을 고려하여 반영한다.

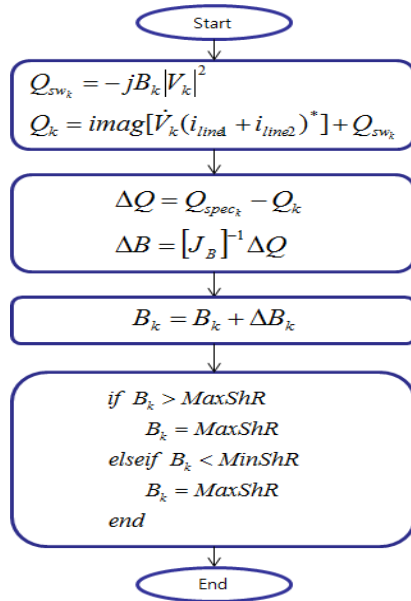


그림 5 제안된 switch shunt 제어 순서도
 Fig. 5 Proposed switch shunt control algorithm flow chart

2.4 사례연구

이번 장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘을 이용하여 실제 계통에 적용해보겠다. 사례연구에 사용된 계통은 실제 계통 구성에 부하예측량을 반영하여 부하량과 발전량이 수정된 계획데이터이다. 예측부하량은 표에서 보는 바와 같이 65,000MW로 설정하였다. 계통구성요소와 부하량은 다음 표 3,4와 같다.

표 1 사례계통 구성
 Table 1 Configuration of the case study

구분	개수
모선 수	1313
발전기 수	234
Switched Shunt	336
부하모선	1210
선로	2430
변압기	531

표 2 사례계통 발전/부하량
 Table 2 Generation/Load amount of the case study

구분	유효전력[MW]	무효전력[MVAR]
발전기	65,977.9	12,876.6
부하	65,000.0	15,467.7

PSS/E를 이용하여 사례계통에 대해 조류계산을 수행한 결과 다음 그림 6과 표 3과 같이 17회 계산 후 발산하였다. Switched shunt제어를 수행하도록 했지만 오차가 제어범위 안에 들어오지 않아서 조류계산 중에 switched shunt 제어는 수행되지 않았다.

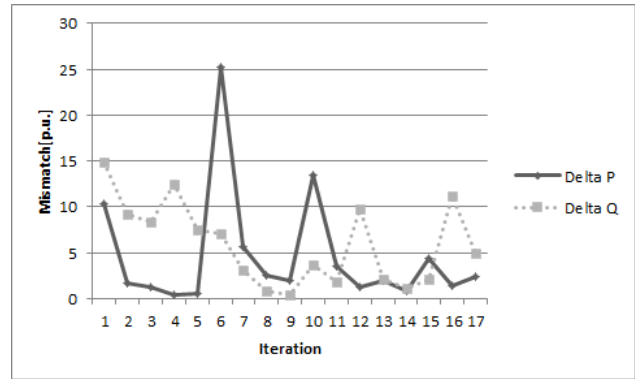


그림 6 PSS/E에서의 조류계산 수렴특성
 Fig. 6 Power flow converge progress in PSS/E

표 3 PSS/E에서의 조류계산 과정
 Table 3 Power flow progress output in PSS/E

ITER	DELTAP BUS	DELTAQ BUS
0	10.3207(29252)	14.9125(10150)
1	1.7197(3250)	9.1528(10300)
2	1.1950(10150)	8.3139(8855)
3	0.3451(4940)	12.5053(4700)
4	0.5392(8800)	7.4306(8426)
5	25.1788(8800)	7.0169(8810)
6	5.6893(8800)	3.0375(8810)
7	2.5971(8800)	0.8311(8810)
8	1.9164(8800)	0.3937(8600)
9	13.4980(8800)	3.6574(8600)
10	3.5435(8800)	1.7981(8600)
11	1.2584(8600)	9.6943(8855)
12	1.9249(8800)	2.1547(8855)
13	0.8581(8470)	1.0662(10150)
14	4.3056(10300)	2.0700(10150)
15	1.4427(10700)	11.1845(10150)
16	2.3355(8600)	4.9451(10150)

BLOWN UP AFTER 17 ITERATIONS
 LARGEST MISMATCH: -246.17 MW 29.52 MVAR
 SYSTEM TOTAL ABSOLUTE MISMATCH: 9655.41 MVA

다음 그림 7은 사례계통에 대해 자체개발한 조류계산을 수행한 후, 매 반복횟수별 최대 오차를 나타낸 것이다. 5번째까지 오차가 수렴되다가 발산되는 것을 확인할 수 있다. 무효전력이 부족하여 저전압현상이 발생하고, 따라서 송전손실이 증가하여 조류계산이 수렴하지 않는 전형적인 경우이다.

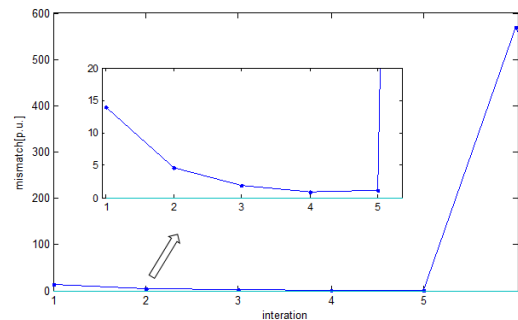


그림 7 조류계산 오차 그래프
 Fig. 7 Power flow mismatch graph

조류계산 과정 중 모선의 전압분포를 살펴보았다. 계통의 상태와 전압 초기치에서 조류계산이 1회에서 발산하는 것을 방지하기 위해, 조류계산시 초기전압은 모든 부하모선의 전압크기를 1.0, 위상각을 0으로 놓고 조류계산을 수행 하였다.

아래 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 조류계산이 수렴 되는 과정에서 무효전력 부족으로 전압이 계속 떨어지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

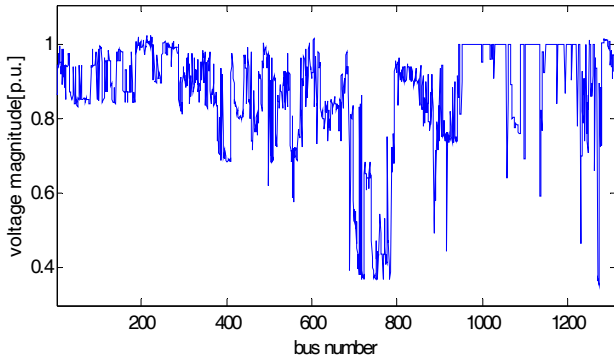


그림 8 3회 계산후의 모선전압
Fig. 8 Voltage magnitude after 3rd iteration

계통의 발전량과 부하량의 유효전력은 명시적으로 손실을 고려하여 조정할 수 있지만, 무효전력 공급량은 명시적으로 설정할 수 없고, 무효전력은 멀리서 공급할 수 없다는 지역적 특징으로 인해, 전체 무효전력 공급량은 수요량보다 많더라도 무효전력이 부족해서 저전압 현상이 발생하는 모선이 있을 수 있다. 이러한 경우 기존방식에서는 숙달된 계통해석 전문가가 경험에 의해 무효전력 설비를 수동으로 조정하여 조류계산을 수렴 시켰는데, 이러한 과정은 매우 시간이 많이 걸리는 지루한 작업이었다.

동일한 사례계통에 대해 제안된 알고리즘을 적용하여 switch shunt를 제어하였다. 계산결과 투입된 switch shunt 양은 다음 그림 9와 같다. 종전과 같이 한 스텝씩 투입/제거 되는 것이 아니라 한 번에 필요한 만큼이 모두 반영되기 때문에 큰 값을 나타낸 곳도 있음을 확인할 수 있다.

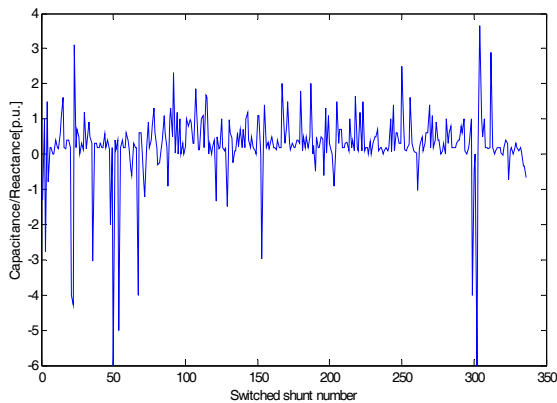


그림 9 1회 조류계산 이후 투입된 switch shunt량
Fig. 9 Switch shunt admittance at 1st iteration

다음 그림 10은 제안된 알고리즘을 적용하여 switch shunt를 투입하였을 때 조류계산 반복횟수별 전압크기를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 switch shunt가 제때에 적정량 투입됨에 따라 조류계산 반복과정에서 전압저하 현상이 크게 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

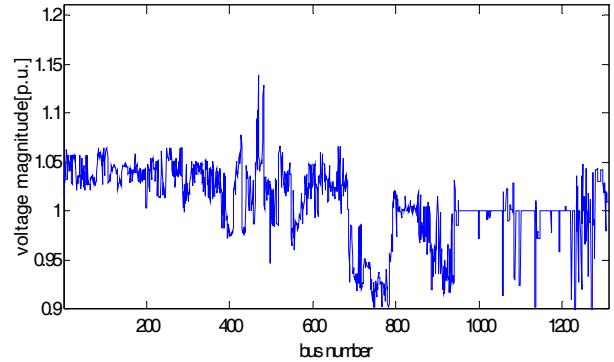


그림 10 3회 조류계산 후의 모선전압
Fig. 10 Bus voltage magnitude after 3rd iteration

다음 표 4와 그림 11은 제안된 switch shunt제어 알고리즘을 이용한 조류계산의 수렴특성을 나타낸 것이다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 수렴특성은 매우 양호한 것을 확인할 수 있다.

표 4 조류계산 수렴특성

Table 4 Power flow mismatch with iteration

Iteration	Mismatch[p.u]
1	14.0177
2	4.6336
3	1.8881
4	0.8143

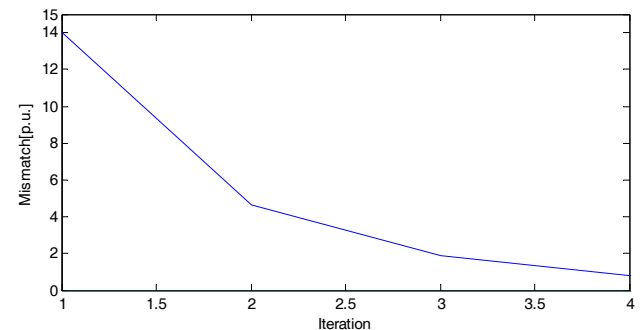


그림 11 switch shunt 제어 알고리즘이 반영된 조류계산 수렴 특성

Fig 11 Power flow mismatch graph with switch shunt control

3. 결 론

본 논문에서는 switch shunt를 이용하여 계통의 무효전력을 제어하는 방법에 대해서 논의하였다. 일반적인 조류계산 방법은 계통의 미소한 변화에 대해서 조류와 전압을 파악하는데 유용하지만, 계통 계획과 같은 큰 부하량 변동이 큰 계통변화에 대해서는 적합하지 않을 수 있음을 알 수 있었다. 이렇게 계통의 초기조건이 infeasible영역에서 해를 갖도록 되어 있는 경우, 조류계산 결과를 얻기 어려울 뿐만 아니라 조류계산이 수렴되었다하더라도 저전압현상과 같은 전압불안정이 나타날 수 있다. 본 논문에서는 이러한 계통계획시 무효전력 배분을 위한 방법으로 전압과 투입량과의 자코비안을 이용 switch shunt의 투입량을 제어하는 알고리즘을 제시하였다.

제시된 알고리즘을 이용하여 switch shunt의 투입량을 제어한다는 것은, 계통의 조류계산 해가 존재하는 영역 자체를 이동시키는 결과를 나타낸다. 제안된 알고리즘을 실제계통에 적용한 결과 저전압현상이 해소되고 발산하던 조류계산도 수렴되었고 계산결과에도 저전압현상이 발생하지 않음을 확인하였다. 향후 switch shunt의 투입량을 현재 설비량에 한정시키지 않거나, switch shunt가 설치되어 있지 않은 모선까지도 제어 대상으로 고려할 경우 무효전력 설비 계획에도 활용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Arthur R. Bergen and Vijay vittal, "Power System Analysis 2nd Ed.", Prentice-Hall, 2000,
- [2] Jaianand Jayaraman, "Study of Reactive Power/Voltage Sensitivities in Interconnected Power System Networks", 42nd South Eastern Symposium in System Theory, 2010,
- [3] PTI, PSSE Program Operation Manual. 2009
- [4] W. Zhang, and L. M. Tolbert, "Survey of Reactive Power Planning Methods", IEEE Trans. Power Engineering Socceity, General Meeting, June, 2005.
- [5] K. Y. Lee, Y.M.Park, and J. L. Ortiz, "A United Approach to Optimal Real and Reactive Power Dispatch", IEEE PES Summer Meeting, Seattle, Washington, July 15-20, 1984
- [6] D M Tagare, "Reactive Power Management", Tata McGraw-Hill, 2004

저 자 소 개



오 성 균 (吳 成 均)

2002년 충남대 전기공학과(석사). 2010년~현재 한국원자력안전기술원 계측전기평가실 선임연구원
Tel : 042-868-0883
E-mail : osk@kins.re.kr



양 민 욱 (梁 旻 旭)

2007년 충남대학교 전기공학교육과 학사
2007년 충남대학교 컴퓨터공학과 학사
2009년 충남대학교 전기공학과 석사
2011년 충남대학교 전기공학과 박사수료
Tel : 042-821-7609
E-mail : minux@cnu.ac.kr



김 건 중 (金 建 中)

1985년 서울대학교 전기공학과(박사).
1980년~현재 충남대학교 전기공학과 교수
Tel : 042-821-5659
E-mail : kjkim@cnu.ac.kr