

## 뉴턴법 조류계산에서 해의 조정에 관한 연구

朴源深      安在承  
제어계측공학과    전기공학과

### <요 약>

전력시스템의 해석에 널리 쓰이는 뉴턴법 조류계산은 해의 수렴성이 우수한 특성을 가지고 있으나, 해를 구하는 과정에 전압이나 무효전력 등의 제약이 포함되면 전체적인 수렴특성이 현저하게 나빠진다. 본 연구에서는 전압제약을 반영하기 위한 조정방법이 뉴턴법 해과정에서 어떤 영향을 미치는지 규명하고 수치계산에 큰 영향을 미치지 않고도 효과적으로 해를 구할 수 있는 조정산법을 제안하였다. 제안한 산법을 샘플 5모선과 IEEE-14에 적용해 보고 그 효용성을 검증하였다.

---

## A study on the adjusted solution in the Newton's type load flow calculation

Park, Won-Sim · An, Jae-Seung

Dept. of Control & Instrumentation Engineering · Dept. of Electrical Engineering

### <Abstract>

The Newton's load flow calculation method is widely used in the analysis of electric power system for its good convergence characteristics. However, in considering of adjustment for voltage/reactive power constraints, it shows poor convergency problem. In this paper, the effective adjustments for the Newton's load flow analysis are studied and proposed to improve the convergence of solution. Case studies for sample 5 bus system and IEEE-14 system provide satisfiable results.

---

이 논문은 1994학년도 울산대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구되었음

## 1. 서 론

뉴턴법 조류계산은 전력시스템에서 나타나는 비선형 문제를 자코비안 행렬로 표현되는 선형 연립방정식으로 변환시켜 축차적으로 해를 구하는 방법이다. 특히 시스템 행렬에 영요소가 많을 경우 스퍼스티(sparsity)기법을 도입하여 대규모 시스템 문제에 쉽게 적용할 수 있을 뿐만 아니라 계산시간이 적게 걸리는 장점을 가지고 있다. 현재 상용화되어 있는 대부분의 조류계산법은 뉴턴-랍슨(Newton-Raphson) 또는 그 변형인 분할법(Decoupled method)이 쓰이고 있다.<sup>[1][2]</sup>

그런데 실제의 전력시스템에는 여러가지 형태의 제어설비들이 있으며, 이러한 설비의 조정문제가 개입되면 본래의 뉴턴법 조류계산의 잇점인 수렴성이 크게 둔화되어 버린다. 특히 전력시스템의 해석이나 운용에 대두되는 제약인 전압과 무효전력의 조정방안이 문제가 된다. 알려진 전압-무효전력의 조정방안으로는 발전기 모선에 대한 무효전력 제한치 추가, 부하모선에 대하여는 변압기 탭 제어, 발전기 원격전압제어, 커패시터/리액터 스위칭 등을 들 수 있다.<sup>[3][4][5]</sup>

뉴턴법 조류계산에서 이러한 형태의 조정은 주로 시뮬레이션 기법에 의존하게 되는데, 이 시뮬레이션 기법의 양부에 따라 뉴턴법의 잇점인 수렴성에 나쁜 영향을 주어 반복횟수의 증가뿐 아니라 해의 진동이나 발산을 유발하기도 한다.

본 연구에서는 뉴턴법으로 해를 구하는 과정에서 이러한 조정법이 미치는 영향을 분석해 보고, 계산능률의 둔화를 막기 위한 몇 가지 방안을 제시하였다.

널리 쓰이는 조정법의 적용은 조류계산 반복 2회째나 그 후에 시도되는데<sup>[6]</sup>, 이러한 적용원칙은 경험적으로 부여한 순서에 불과하다. 이에 본 연구에서는 해과정에 얻을 수 있는 전력편차를 이용하여 조정법의

도입여부를 정하도록 함으로써 전체적인 수렴성을 개선하였다. 또 조정에 따른 진동이나 발산의 원인이 초과증분전력편차에 기인함을 알아내고, 이를 효과적으로 해소하기 위하여 별도의 보조해법을 도입하였다. 보조해법은 초과증분전력 편차가 발생한 모선의 전력편차를 삼각화분해하여 편차전압을 구한 후 전체적인 전압해를 수정하여 주해법 과정에서 발생할 수 있는 진동이나 발산의 원인을 해소하는 방법이다.

제안한 기법의 타당성을 검토하기 위하여 샘플 5모선 계통과 IEEE-14모선에 적용하였으며, 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

## 2. 해의 조정

뉴턴법 조류계산 알고리즘은 초기 추정값인 전압의 위상각과 크기를 이용하여 식(1)식과 같은 행렬식을 축차적으로 풀어 해를 구한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (1)$$

이 식에서 행렬 H N M L은 자코비안 부행렬이고,  $\theta$ 와 V는 각각 전압의 위상각과 크기, P와 Q는 각각 해당모선에 주입되는 유효 및 무효전력이다. 자코비안 행렬의 요소들은 이전 반복에서 구해진 전압의 함수로 표현되므로 매 반복시 새로운 값으로 구성된다. 조정법이 도입되지 않은 경우라면 보통 4~6회의 반복으로 해를 구할 수 있다.

전력시스템의 조류계산시 해를 조정하는 방법에는 변압기 탭, 커패시터/리액터 스위칭, 발전기 모선에서의 원격전압 제어, PV-PQ 모선 스위칭법 등이 있는데, PV-PQ모선 스위칭 및 변압기 탭 변환시에 자코비안 행렬의 재삼각화가 필요하다. 자코

비안 행렬의 재삼각화 하는 방법으로는 부분 행렬 재인수화(partial matrix refactorization)법과 계수수정(factor updating)법이 있는데 두 방법의 계산능률에는 차이가 없다. 본 연구에서는 계수수정법을 이용하여 해를 구하였다.<sup>[7]</sup>

해를 구하는 과정에 조정법이 포함되면 여러가지 외란이 되따르게 되는데, 이 외란이 수렴을 나빠지게 하고 때로는 진동이나 발산까지 유발시킨다. 진동이나 발산의 문제점은 조정과정중 수정량의 크기를 제한하므로써 효과적으로 완화시킬 수 있다. 수렴이 둔화되는 원인은 주로 수정에 따른 초과 증분 전력편차로 밝혀졌는데, 이를 해결하기 위한 효과적인 방안으로 별도의 보조루틴을 수행시키도록 하였다. 보조해법은 초과 증분 전력편차를 최소화하여 주해법과정에서 발생하는 외란을 연속적으로 감소시키게 된다.

조정법중 커패시터/리액터 스위칭 및 변압기 탭 조정에 나타나는 이산화(discretization) 현상은 무시하였다. 조정법은 조정의 상대적인 순서에 따라 계산효율의 차이를 나타내는데, 검토결과 커패시터/리액터 스위칭과 PV-PQ 스위칭을 수행한 후에 탭 조정과 발전기 원격전압제어를 하는 편이 계산상 유리함을 알 수 있었다.

또 조정법은 조류계산 초기부터 적용하는 것 보다 조류계산의 해가 어느정도 정확해질 때 적용하는 것이 좋는데, 경험적으로 2~3회의 반복 후에 적용시키는 것이 반복횟수를 줄일 수 있다.<sup>[8]</sup>

### 2. 1. PV-PQ모선 스위칭

해를 구하는 과정에 PV 지정모선이 무효 전력 한계치를 초과하게 되면 이 PV 지정모선을 무효전력 한계치를 가지는 PQ지정모선으로 변환시키는 방법이다. 이 모선 스위칭법의 초기 도입은 조류해에 외란을 일으키고 back-off의 제한이나 새로이 다른

모선의 무효전력 한계치를 초과하는 문제점을 야기한다. 이점을 해결하기 위하여 주해법을 수행하는 도중에 부등 제약식을 만족시키도록 하는 보조루틴을 추가하였다.

보조해법의 목적은 새로운 무효전력 한계치와 back-off를 확인하고 새로운 조정법이 도입되도록 모선의 전압을 수정하는 것이다. 주해법 과정에서 식 (1)에 의해 전압을 갱신한 후 PV지정모선 j에서의 무효전력 발생분  $\Delta Q_{sj}$ 는

$$\Delta Q_{sj} = V_j \sum [ \Delta V_i (G_{ji} \sin \theta_{ji} - B_{ji} \cos \theta_{ji}) ] \quad (2)$$

이때 새로 한계치를 초과한 PV지정모선이 나타나면 PQ지정모선으로 바뀌며, 자코비안 행렬의 재삼각화를 수행한다. 즉, 자코비안 행렬요소에 PQ지정모선으로 바뀐 모선을 포함시켜야 한다. 이 조정단계에서 나타나는 증분 무효전력편차  $\Delta Q_{mis}$ 는

$$\Delta Q_{mis} = Q_{lim} - Q_{sj} \quad (3)$$

단,  $Q_{lim}$  : MVAR 한계치

$Q_{sj}$  : 수정된 무효발전력

만일 PQ지정모선으로 바뀐 어떤 발전기 모선이 한계치로 back-off되면 이 모선은 다시 PV지정모선으로 변환되며, 다시 행렬을 재삼각화해야 하므로 이 모선을 자코비안 행렬에서 제거한다. 이때 back-off으로 인해 j모선의 전압을 수정해야 하는데 전압의 수정량  $\Delta V_j$ 는

$$\Delta V_j = V_{sj} - V_j \quad (4)$$

로 구해진다. 식에서  $V_{sj}$ 는 지정된 전압이다. 전압의 수정에 따라 j모선에 연결된 i모선에서의 증분무효전력편차는

$$\Delta Q_{mis} = \Delta V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

이 된다. 해가 어느정도 정확해질 때 스위칭이 이루어지므로 back-off의 횟수는 적어진다.

## 2.2. 커패시터/리액터 스위칭

임의의 모선전압은 그 모선과 관련하여 제어할 수 있는 커패시터/리액터를 통하여 지정된 전압의 범위에서 유지시킬 수 있다. 커패시터/리액터의 조정은 이산화된 형태를 취하지만 통상 계산과정에서는 무시하고 구한다. 이제 커패시터/리액터 조정모선  $j$ 의 전압이 제한치를 벗어나면 조정치인 병렬어드미턴스를 첨가시켜 전압을 복구시킨다. 병렬어드미턴스의 스위칭으로 발생하는 전압의 변화량은

$$\Delta V_i = S \Delta b_i \quad (6)$$

병렬어드미턴스의 변화로 모선에 증분무효전력편차가 발생하게 되는데, 그 변화량  $\Delta Q$ 는

$$\Delta Q = \Delta b_i V_i^2 \quad (7)$$

이 변화량은 식 (1)에 포함되어 주해법과 정에서 구하게 된다.

## 2.3. 변압기의 탭 조정

모선  $i$ - $j$ 사이의 탭절환 변압기(LTC)를 사용하여 모선  $k$ 의 전압을 커패시터/리액터 스위칭에서와 마찬가지로 연속적인 제어를 할 수 있다. 이때 탭의 증분에 따른 전압변화량은

$$\Delta V_k = S \Delta t \quad (8)$$

식에서  $\Delta V_k$ 는 제어오차이고,  $S$ 는 감도로써  $\pm 1$ (-는 하한치를 벗어나는 경우이고 +는 상한치를 벗어나는 경우)로 만족할만

한 결과를 얻을 수 있다.<sup>[7]</sup> 탭증분치  $\Delta t$ 는 과보상에 의한 해의 진동을 억제하기 위하여 작은 값을 사용할 필요가 있다. 탭증분으로 인한 변압기 2차측 모선의 증분 무효전력편차는

$$\Delta Q_{mis} = (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \Delta t / t \quad (9)$$

이 증분편차는 발전기 모선의 원격전압제어시의 증분편차와 동일한 보조해법을 통하여 해결된다. 보조해법은 PV-PQ스위칭의 경우와 마찬가지로 적용시키며 전압을 수정한다.

## 2.4. 발전기 원격전압 제어

발전기의 원격전압제어는 PV지정 모선의 발전기를 사용하는데, 이 모선의 무효전력 범위 이내로 전압이 유지되도록 원격모선의 전압을 조정한다. 즉, 다른 PV지정 모선의 조정과 다른 점은 무효전력 한계치를 벗어나지 않는 경우에도 전압을 조정한다는 점이다. 모선  $j$ 의 전압을 PV지정 모선  $i$ 로 제어할 때 전압변화량은

$$\Delta V_j = (V_{sp} - V_j) = S \Delta V_i \quad (10)$$

이 전압변화에 의한 증분 무효전력편차는

$$\Delta Q_{mis} = V_i \Delta V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

식 (11)에 의한 증분편차와 변압기 탭조정에 의해 발생한 증분편차 식 (9)는 동일한 보조해법으로 해결된다. PV지정 모선의 전압조정에 의하여 발생한 증분 전력편차는 PQ지정 발전기의 제한치 back-off에 의하여 발생한 것과 유사하게 처리해야 함을 알 수 있다. 만일 하나의 모선이 발전기와 변압기에 의하여 동시에 제어될 경우 발전기의

무효전력발생 제한치까지 우선적으로 전압을 제어한 후 변압기의 탭을 조정하도록 하였다.

### 3. 산법의 흐름

그림 1은 무효전력 조정이 포함된 뉴턴법 조류계산의 전체적인 흐름을 나타낸 것이

다. 그림에서  $S_c$ ,  $S_q$ ,  $S_t$ ,  $S_r$ 은 각각 커패시터/리액터, PV-PQ 스위칭, 변압기 탭 제어, 발전기 원격전압제어의 적용시점을 나타내는 기준치를 나타낸다. 기준치는  $S_q=S_t=S_r$ 로 정하였으며, PV-PQ 스위칭은 두 단계를 거치도록 하였다. 변압기 탭 및 발전기 원격전압제어는 하나의 보조해로 수행시켰다.

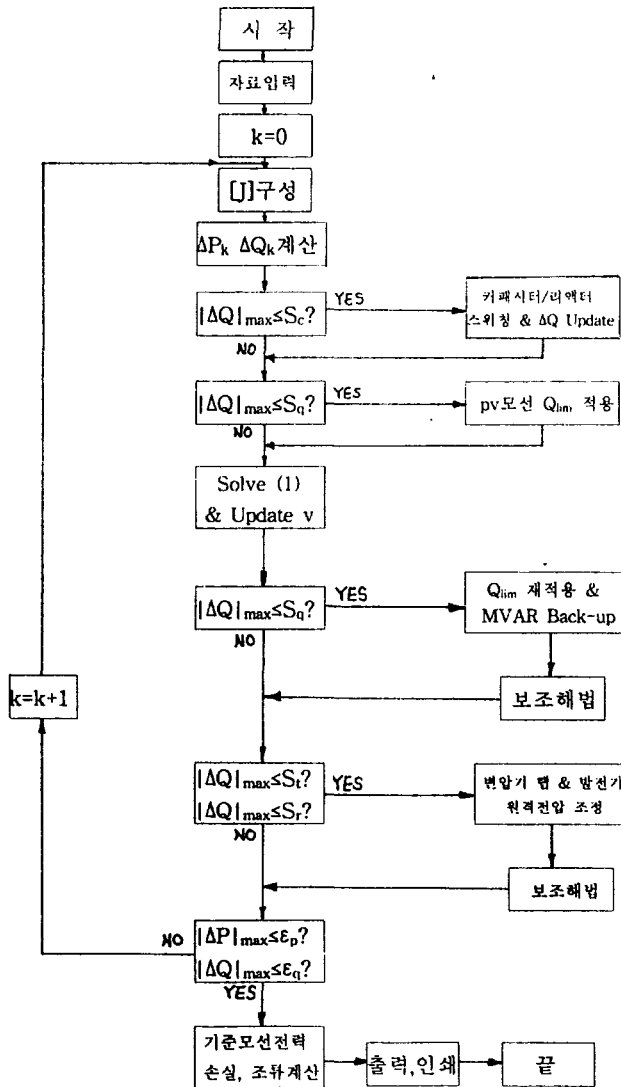


그림 1. 산법의 흐름

Fig. 1. Overall algorithm flow

#### 4. 사례 적용

제안한 산법의 효용성을 검토하기 위하여 널리 인용되고 있는 샘플 시스템인 Stagg의 5모선 시스템과 IEEE-14모선 시스템을 사례로 들고 제량들을 검토하였다.

그림 2와 3은 각각 5모선과 14모선 시스템을 나타낸 것이고 표 1, 2 및 3, 4는 각각 5모선과 14모선 시스템의 모선과 선로데이터인데, 제안한 산법의 효용성을 평가하기 위하여 데이터의 일부를 수정하거나 첨가하

였다. 선로와 모선데이터에서 ①은 커패시터/리액터 적용모선이며 ②는 변압기 탭조정 선로와 모선이고 ③은 발전기 원격전압 조정 모선을 나타내며 ④⑤를 함께 표시한 모선은 변압기와 발전기에 의한 동시제어모선을 나타낸다. 각 조정의 효과를 알아보기 위해 조정법이 적용되는 모선의 목표전압은 1.0[pu]로 정하였다. 수렴의 판정여부는 유.무효전력의 편차량이 1[MW/MVAR]이하가 되면 해가 구해진 것으로 하였다.

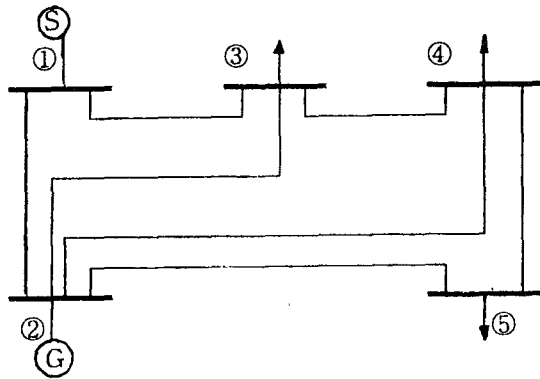


그림 2. 5 모선 샘플 시스템  
Fig. 2. 5 bus sample system

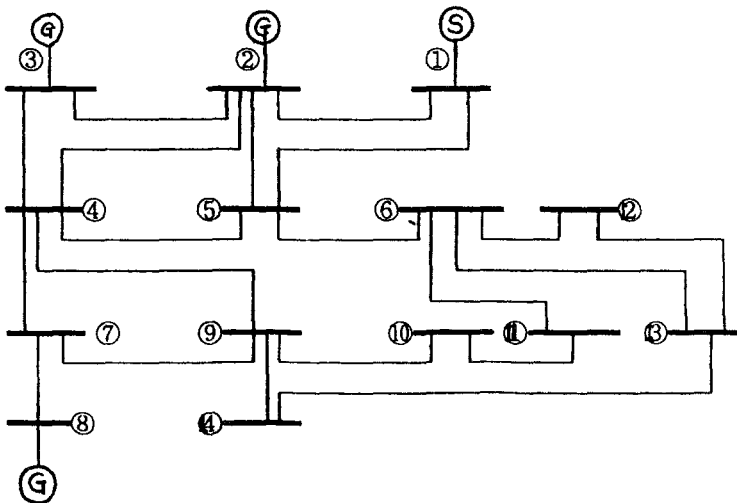


그림 3. 14 모선 시스템  
Fig 3. 14 bus system

표 1. 샘플 5모선 시스템의 선로자료 (100[MVA]기준 단위값)

Table 1. Line data for sample 5 bus system (100[MVA] base pu)

모선코드	임피던스	서셉턴스(1/2)
1 - 2	0.02 + j0.06	0.0 + j0.030
1 - 3	0.08 + j0.24	0.0 + j0.025
2 - 3	0.06 + j0.18	0.0 + j0.020
2 - 4	0.06 + j0.18	0.0 + j0.020
2 - 5	0.04 + j0.12	0.0 + j0.015
3 - 4	0.01 + j0.03	0.0 + j0.010
4 - 5	0.08 + j0.24	0.0 + j0.025

표 2. IEEE-14 시스템의 선로 자료 (100[MVA]기준 단위값)

Table 2. Line data for IEEE-14 system (100[MVA] base pu)

모선코드	임피던스	서셉턴스	변압기탭	조정선로
1 - 2	0.02 + j0.06	0.0 + j0.053		
2 - 3	0.05 + j0.02	0.0 + j0.044		
1 - 5	0.05 + j0.02	0.0 + j0.049		
2 - 4	0.06 + j0.02	0.0 + j0.049		
2 - 5	0.06 + j0.17	0.0 + j0.034		
3 - 4	0.07 + j0.17	0.0 + j0.035		
4 - 5	0.01 + j0.04	0.0 + j0.013		
5 - 6	0.00 + j0.03	0.0 + j0.000	0.932	②
4 - 7	0.00 + j0.02	0.0 + j0.000	0.978	
7 - 8	0.00 + j0.18	0.0 + j0.000		
4 - 9	0.00 + j0.56	0.0 + j0.000	0.969	②
7 - 9	0.00 + j0.11	0.0 + j0.000		
9 - 10	0.03 + j0.08	0.0 + j0.000		
6 - 11	0.10 + j0.20	0.0 + j0.000		
6 - 12	0.12 + j0.26	0.0 + j0.000		
6 - 13	0.07 + j0.13	0.0 + j0.000		
9 - 14	0.13 + j0.27	0.0 + j0.000		
10-11	0.08 + j0.19	0.0 + j0.000		
12-13	0.22 + j0.20	0.0 + j0.000		
13-14	0.17 + j0.35	0.0 + j0.000		

표 3. 샘플시스템의 모선자료  
Table 3. Bus data for sample 5 bus system

모선 형태 i id	전압가정치[pu] e + jf	발 전 Pg[MW]+jQg[Mvar]	부 하 Pd+jQd	무효발전력 Qmin Qmax	
1 0	1.06 + j0.0				
2 2	1.00 + j0.0	40 + j30	20+j10	-10	50
3 1	1.00 + j0.0		45+j15		
4 1	1.00 + j0.0		40+j5		
5 1	1.00 + j0.0		60+j10		

표 4. IEEE-14 시스템의 모선 자료  
Table 4. Bus data for IEEE-14 system

모선 형태 i id	초기전압 [pu]	발 전 Pg + jQg		부 하 Pd + jQd		무효발전한계 Qmin Qmax		조정적용 모 선
1 0	1.060							
2 2	1.050	40.0	10.0	80.7	36.8	-20	40	
3 2	1.050	110.0	50	94.2	19.0	-50	50	
4 1	1.019	0.0	0.0	- 6.9	13.8			
5 1	1.02	0.0	0.0	7.6	1.6			③
6 2	1.020	10.0	20.0	54.8	17.5	-50	40	②
7 1	1.062	0.0	0.0	10.0	20.0			③
8 2	1.090	20.0	20.0	0.0	0.0	-10	40	
9 1	1.060	0.0	0.0	29.5	16.6			①
10 1	1.051	0.0	0.0	9.0	5.8			
11 1	1.060	0.0	0.0	3.5	1.8			
12 1	1.060	0.0	0.0	6.1	1.6			
13 1	1.050	0.0	0.0	-9.7	15.1			
14 1	1.040	0.0	0.0	15.5	5.2			②③



표 5. 조정이 포함되지 않을 경우 5모선 조류계산 결과  
Table 5. 5 bus load flow solution without any adjusting

모선	전압 [pu]	위상각 [ ° ]	발 전 Pg[MW]+jQg[Mvar]	부 하 Pd + jQd	무효발전력	
					Qmin	Qmax
1	1.060	0.0	131.1 + j90.8			
2	1.000	-2.06	40.0 - j71.6	20 + j10	-10	100
3	0.987	-4.64		45 + j15		
4	0.987	-4.96		40 + j5		
5	0.972	-5.76		60 + j10		

5.1. PV-PQ 스위칭

사례 시스템에서 표 5의 2번의 발전기모선이 무효전력한계치를 초과하였으므로 실용해를 얻기 위하여 이 모선을 PQ모선으로 바꾸어 조류계산을 하였다. 결과를 표 6에 나타내었는데 무효전력이 제한치 이내로 되었고 전압도 안정화됨을 알 수 있다.

표 7은 표 3,4의 14모선 시스템에 대한 데이터로 식 (1)의 전후에서 각각 pv-pq

스위칭을 2회에 걸쳐 적용하므로써 보다 적은 반복횟수의 수렴결과를 얻을 수 있었다. 여기서 매 반복시의 최대 유·무효전력편차와 1, 2차 PV-PQ 스위칭 및 back-off를 나타내었고, 1PV-PQ, b-off, 2PV-PQ는 각각 이들이 발생한 모선을 나타낸 것이며 괄호안의 숫자는 모선번호를 나타낸다. 표 8은 새로운 pv-pq조정 기준치 도입시의 효과를 보인 것이다.

표 6. 5 모선 샘플시스템의 조정해 결과  
Table 6. Load flow solution with adjusting (5 bus system)

모선	전압 [pu]	위상각 [ ° ]	발 전 Pg[MW]+jQg[Mvar]	부 하 Pd + jQd	무효발전력	
					Qmin	Qmax
1	1.060	0.0	129.9 + j34.3			
2	1.027	-2.49	40.0 - j10.7	20 + j10	-10	100
3	1.009	-4.64		45 + j15		
4	1.007	-5.17		40 + j5		
5	0.998	-5.98		60 + j10		

표 7. 14 모선 시스템의 pq-pv스위칭의 효과  
 Table 7. Effect of pv-pq switching(14 bus system)

반 복	기존스위칭법			2회스위칭법				
	1pv-pq	max dP	max dQ	1pv-pq	b-off	2pv-pq	max dP	max dQ
1	(3) (8)	0.624	0.716	(3) (8)	(3)	(2) (6)	0.624	0.716
2	(2) (6)	0.042	0.459	(3)			0.051	0.364
3		0.022	0.198				0.030	0.068
4		0.015	0.047				0.004	0.016
5		0.008	0.012				0.002	0.005
6		0.004	0.005					

표 8. pv-pq switching에서 기준치 사용시 효과  
 Table 8. Effect of pv-pq starting criterion

기준치 [pu]	반복회수 (5모선)	반복회수 (6모선)	반복횟수 (14모선)
2.0	3	5	5
1.5	3	5	5
1.0	4	5	5
0.7	*	*	6

\*는 조정법 적용 안됨을 의미

표 8. 수정된 샘플 5모선 시스템의 모선자료  
 Table 8. Modified 5 bus sample system data

모선 형태 i id	전압가정치[pu] e + jf	발 전 Pg[MW]+jQg[Mvar]	부 하 Pd+jQd	무효발전력 Qmin Qmax	
1 0	1.06 + j0.0	.			
2 2	1.00 + j0.0	40 + j150	100+j100	10	100
3 2	1.00 + j0.0	100 + j30	145+ j50	-37	50
4 1	1.00 + j0.0		190+ j50		
5 1	1.00 + j0.0		60+ j10		

### 5.2. PV-PQ스위칭 및 변압기 탭 조정

표 9는 IEEE-14모선 시스템에 대한 pv-pq스위칭과 변압기 탭 조정시의 수렴결과를 나타낸 것이다. 표에 매 반복시의 최대 유효전력 편차, 원격모선의 목표전압을 유지하기 위한 변압기 탭값의 변화 등을 나타내었다. 모선 4와 7 사이 및 모선 4와 11 사이의 변압기를 이용하여 각각 모선 6

과 모선 14의 전압을 제어하는 경우를 고려하였으며, 이때 목표전압은 1.0[pu]로 정하고 0.97-1.02[pu]의 범위에 있으면 목표값에 도달한 것으로 설정하였다. 주 해법 과정에서의 전압을 비교하여 보조해법에서 변압기 탭 설정을 연속적으로 변화시키므로 전압이 조정되는 과정을 볼 수 있다. 표에서 알 수 있듯이 목표전압을 위하여 3~4번의 반복으로 해가 수렴된다.

표 9. pv-pq스위칭과 변압기 탭의 제어 결과 (14모선)  
Table 9. The result of pv-pq switchicg & Tr. tap control

반 복	max dP	max dQ	Tr tap 변화		전 압	
			4-7 간	4-11간	main/aux BUS 6	main/aux BUS 14
1	0.624	0.716	0.959	1.022	0.973/0.999	0.947/0.973
2	0.044	0.365	1.067	1.159	0.893/1.013	0.863/0.981
3	0.070	0.396	1.087	1.218	0.979/1.009	0.941/0.975
4	0.024	0.154		1.254	0.999/	0.963/0.976
5	0.006	0.092			1.003/	0.971/
6	0.002	0.004			1.003/	0.971/

### 5.3. 복합적 조정의 결과

표 10은 변압기 탭, pv-pq 스위칭 및 발전기 원격전압제어의 결과를 나타내었다. 발전기의 조정을 위해 데이터의 일부를 수정하여 계산한 결과를 나타낸 것이다. 표에서 7번 모선은 변압기만의 제어를 나타낸

것이고 9번 모선은 변압기와 발전기에 의한 제어를 보인 것이다. 9번 모선은 원격제어 발전기로 무효전력 한계치까지 조정을 한 후 변압기에 의하여 목표치까지 조정되는 과정을 보여주고 있다. 여러가지의 복합적인 조정에도 불구하고 반복횟수의 증가는 크지 않음을 알 수 있다.

표 10. IEEE-14 모선 계통에서의 복합적인 조정결과  
Table 10. Adjustment results on IEEE-14 system

반 복	㉔전압	㉕Tap	㉖GEN	㉗max dP	㉘max dQ	㉙전 압	㉚스위칭
0	B⑦1.0	0.978					
	B⑨1.0	0.969	-10<Q<50				
1	B⑦1.019	0.978		1.172	1.195		
	B⑨1.018	0.969					
2	B⑦0.984	1.014		0.050	1.008	1.114	2,6bus
	B⑨0.954	0.969	Q=0.458			1.127	:1pv-pq
3	B⑦1.034	1.014		0.025	1.160		8bus
	B⑨1.016	0.969	Q=0.5				:1pv-pq
4	B⑦0.947	1.087		0.021	0.040	1.025	
	B⑨0.939	1.060				1.015	
5	B⑦1.001	1.087		0.032	0.554	1.011	
	B⑨0.991	1.099				1.004	
6	B⑦1.008	1.087		0.008	0.093		
	B⑨1.001	1.099					
7	B⑦1.008	1.087		0.000	0.000		
	B⑨1.001	1.099					

- 단, ㉔는 주해법 과정에서 식(1) 후의 전압  
 ㉕는 조정용 변압기 탭 값  
 ㉖는 조정용 발전기의 무효전력 한계치 및 무효전력 변화  
 ㉗는 최대유효전력 편차  
 ㉘는 최대무효전력 편차  
 ㉙는 보조해법을 통한 전압수정값  
 ㉚는 조정법이 도입된 모선을 표시함.

### 5. 결 론

뉴턴법 조류계산의 해과정에 제어설비에 제약에 의한 조정이 필요할 경우, 그 영향을 분석해 보고 이를 토대로 효과적인 조정해법을 제안하였다. 조정과정에서 적절한 초기치를 부여하므로써 전체적인 반복회수가 감소되도록 하였으며, 보조해법을 도입하여 초과 증분편차로 인한 진동과 발산의 원인을 효과적으로 둔화시켜 조정과정에서 부수적으로 나타나는 반복회수를 줄일 수 있었다.

제안한 방법은 뉴턴법의 변형인 분할법 등에도 그대로 적용될 수 있으며, 최적전력 조류 계산법이 정착되지 못한 단계에서 조류계산 해의 조정에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

1. A. F. Glimn and G. W. Stagg, "Automatic Calculation of Load Flow Study", Trans. on AIEE PAS Vol. 76, pp. 817, Oct. 1957.

2. W. F. Tinney, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 86, pp. 1449-1967, Nov. 1967.
3. B. Stott, "Review of Load Flow Calculation Methods", Proc. IEEE, Vol. 62, No. 6, July 1974.
4. B. Stott, "Decoupled Newton Load Flow", IEEE Trans. on PAS. Vol. 91, pp. 1955-1957, May/June 1971.
5. B. Stott and O. Alsac, "Fast Decoupled Load Flow", IEEE Trans. on PAS, Vol. 93, pp. 859-869, May/June 1974.
6. N. M. Peterson and W. S. Meyer, "Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton's Power Flow", IEEE Trans. on PAS, Vol. 90, pp. 103-108, Jan/Feb, 1971.
7. S. K. Chang, "Adjusted solution in fast decoupled load flow", IEEE Trans. on Power System, Vol. 3, pp. 726-732, May 1988.
8. J. H. Kim, K. J. Hwang, "An Efficient Power Flow Programming", Jour. of KIEE, Vol. 29, No. 12, Dec. 1980.
9. W. F. Tinney, M. S. Mayer, "Solution of Large Sparse System by Ordered Triangular Factorization", IEEE Trans. on AC, Vol. 18, No. 4, Aug., 1973.
10. Stagg and El-Abied, "Computer Methods in Power System Analysis", McGraw-Hill Co., New York, pp. 257-341, 1968.
11. M.A. Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill, New Delhi, pp. 111-136, 1979.