

**Decoupled법을 이용한 연속조류계산 시스템의 개발**

박민석, 송화창, 이병준, 권세혁  
고려대학교 전기전자전파공학부

**The Improvement of Continuation Power Flow System Using Decoupled Method**

Minseok Park · Hwachang Song · Byongjun Lee · Sae-Hyuk Kwon  
Schools of Electrical Engineering, Korea University

**Abstract** - Continuation power flow has been developed to remove the ill-condition problem caused by singularity of power flow Jacobian at and near steady-state voltage instability point in conventional power flow. When solving large-scale power transmission systems, an alternative strategy for improving computational efficiency and reducing computer storage requirements is the decoupled power flow method, which makes use of an approximate version of the Newton-Raphson procedure. This paper presents a technique to improve the speed of continuation power flow system using decoupled power flow method.

**1. 서 론**

계통의 전압안정도 해석에서 정적인 전압불안정점을 계산하는 것은 아주 중요하다. 그러나 일반적인 뉴턴-랩슨(N-R) 법에서는 정적인 전압불안정점 부근에서 자코비안이 특이성을 갖게 되므로 조류계산이 발산하게 되고 따라서 정적인 전압불안정점을 구할 수 없었다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 강인한 수렴 특성을 갖는 연속 알고리즘을 전력조류계산에 적용한 연속조류계산 시스템이 개발되었다.[1] 그러나, 실제 적용시 계산시간이 많이 소요된다는 문제가 발생되어 이의 개선을 위한 노력이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 이러한 관점에서 연속조류 계산 시스템의 수행능력의 향상을 위하여 Decoupled 법[2]을 연속조류계산 시스템에 적용하는 방안을 제안하고 있다. 본 논문에서는 먼저 P-Q 분할을 이용하는 Decoupled법을 연속조류계산 시스템에 적용하는 과정을 보인다. 그리고 부하가 증가할 경우 Decoupled법은 수렴성의 저하로 인해 계산시간이 증가하는 문제가 발생하므로 전압불안정점 근처의 중부하에서 뉴턴-랩슨법으로의 전환을 제안하고 있다. 그리고, P-Q분할에 의한 Decoupled법의 수렴성 문제를 개선한 이른바 Enhanced Decoupled법[3]을 적용하는 것이 계산 수행능력을 더 향상시킬 수 있음을 보인다. 사례연구에서는 771모선 실제계를 이용하여, 본 논문에서 제안한 방법이 연속조류계산 시스템의 수행능력 향상에 미치는 영향을 검토한다.

**2. Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템**

**2.1 예측과정으로의 적용**

예측과정은 현재의 조류해로부터 다음해의 추정값을 구하는 과정이다. 수정된 자코비안을 이용하여 식(1)에서 접선벡터  $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 를 계산할 수 있으며 현재해  $[\delta_0 \ V_0 \ \lambda_0]^T$ 에서 다음해의 추정값  $[\delta_1^* \ V_1^* \ \lambda_1^*]^T$ 은 식(2)를 통해서 구한다.

$$\begin{bmatrix} p_\delta & p_V & p_\lambda \\ q_\delta & q_V & q_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N & p_\lambda \\ K & L & q_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_1^* \\ V_1^* \\ \lambda_1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 밑줄은 벡터를 나타내고  $e_k$ 는 k번째 성분이 1이고 나머지 성분들은 0인 행벡터이다.

P-Q 분할특성(Decoupling)을 이용해서 식(1)을 간략화하면 식(3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H & 0 & p_\lambda \\ 0 & L & q_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$e_k$ 에서 결정되어지는 연속파라미터의 선택은 수렴성의 문제로 인해  $\delta$ 성분은 선택하지 않는 것으로 가정할 수 있다. 그러면 식(3)은 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H & 0 & p_\lambda \\ 0 & L & q_\lambda \\ 0 & e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

즉,  $e_k$ 를 모든 성분이 0인 행벡터와  $e'_k$ 로 분리해서 나타낸 것이다. 여기서,  $e'_k$ 는 k번째 성분이 1이고 나머지 성분은 1인 행벡터이다. 식(4)를 두 부분으로 나누면 식(5),(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} H & p_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} L & q_\lambda \\ e'_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)에서 접선벡터  $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 중  $[dV \ d\lambda]^T$ 성분을 구할 수 있다. 식(6)에서 구해진  $d\lambda$ 값을 (5)식에 반영하기 위해 (5)식을 식(7)과 같이 수정한다.

$$\begin{bmatrix} H & p_\lambda \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\delta \\ d\lambda' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda' \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)의 우변의  $d\lambda'$ 은 (5)식에서 구해진  $d\lambda$ 값을 나타낸다. 식(7)에서  $d\delta$ 성분을 계산하여 포함시키면 접선벡터  $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 를 구할 수 있게된다.

즉, 식(1)으로 나타내어졌던 예측과정이 식(6),(7)과 같이 분할수정되어진다.

**2.2 수정과정으로의 적용**

수정과정은 예측과정에서 구한 다음해의 근사치로부터 정확한 평형해를 구하는 과정이다. 이 과정은 예측된 해를 초기 추정값으로 하여 식(8),(9)에 의한 반복법에 의하여 구된다.

$$\begin{bmatrix} H & N & p_\lambda \\ K & L & q_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) \\ -\Delta(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \delta_1^{*(k+1)} \\ V_1^{*(k+1)} \\ \lambda_1^{*(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1^{*(k)} \\ V_1^{*(k)} \\ \lambda_1^{*(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta V \\ \Delta\lambda \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.1절에서의 마찬가지로 P-Q 분할특성(Decoupling)을

이용해서 전개하면 식(8)은 식(10),(11)과 같이 분할수정되어진다.

$$\begin{bmatrix} L & q_d \\ e_k & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} H & p_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) \\ \Delta \lambda^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

식(7)에서와 마찬가지로 식(11)의 우변의  $\Delta \lambda^*$ 은 식(10)에서 계산된  $[\Delta V \ \Delta \lambda]^T$ 중  $\Delta \lambda$ 를 반영하기 위해 식(11)의 우변에 포함시킨 것이다.

### 2.3 Enhanced Decoupled법

전력 계통이 R/X비율이 큰 송전선을 어느정도 가지고 있거나, 부하수준이 높은 경우에 Decoupled법은 많은 반복과정이 필요하거나 또는 심지어 수렴하지 못하는 경우가 발생한다. Enhanced Decoupled법[3]은 뉴턴-랩슨법에서 비대각 부분 행렬(N, K)의 영향을 부분적으로 무시하는 것으로 수렴특성과 전체 계산속도가 Decoupled법보다 많이 개선되어진 방법이다. Enhanced Decoupled법과 Decoupled법의 차이점은 비대각 부분 행렬 N, K중 영향을 보다 적게 미치는 부분만 무시하는 것이다. 즉, 뉴턴-랩슨법을 식(12)와 같이 나타낸다고 하면 Enhanced Decoupled법은 식(13),(14)과 같이 나타내어지는 것이다. N, K중 K성분만 무시되어진 것을 예로 들었다.

$$\begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a \\ -a \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$H \Delta \delta = -a - N \Delta V \quad (13)$$

$$L \Delta V = -a \quad (14)$$

즉 Decoupled법과 다른점은 식(13)의 우변에  $-N \Delta V$ 를 포함시킨다는 점이다.

### 2.4 Enhanced Decoupled법의 적용

수렴특성과 전체계산속도의 향상을 위하여 식(11)에 Enhanced Decoupled 법을 적용하면, 식(15)과 같이 수정되어진다.

$$\begin{bmatrix} H & p_d \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -h(\delta_1^*, V_1^*, \lambda_1^*) - N \Delta V \\ \Delta \lambda^* \end{bmatrix} \quad (15)$$

즉, Enhanced Decoupled법을 적용한 경우의 수정과정은 식(10),(15)에 의해서 이루어진다.

## 3. Dishonest Decoupled법

뉴턴-랩슨법의 반복과정에서  $h(x) = c$ 의 해 ( $x_s$ )에 접근해갈 때, 초기 추정값에서의 계산된 자코비안을 계속 이용하는 방법을 Dishonest 뉴턴-랩슨법이라고 한다.(그림1) 이 알고리즘을 연속조류계산에 적용했을 경우, PV 모션이 PQ모션으로 바뀌어 자코비안 행렬의 차원이 변하지 않는다면 각 연속스텝의 수정과정에서 한번의 자코비안 계산과 행렬분해만을 필요로 하므로 대형계통에 대한 연속조류계산 수행시 계산량과 계산시간 단축이 가능하다.[4]

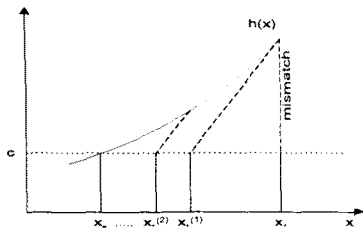


그림1 Dishonest 뉴턴-랩슨법의 개념

Dishonest Decoupled법은 Dishonest 뉴턴-랩슨법의 개념을 Decoupled법에 적용시킨 것으로, 초기 추정값에

서 계산된 두 개의 부분 자코비안  $\begin{bmatrix} L & q_d \\ e_k & I \end{bmatrix}$ ,  $\begin{bmatrix} H & p_d \\ 0 & I \end{bmatrix}$ 을 수정과정의 반복계산에 계속 이용하는 것이다. Dishonest 뉴턴-랩슨법과의 차이점은 PV모션이 PQ모션으로 바뀔 때  $\begin{bmatrix} L & q_d \\ e_k & I \end{bmatrix}$ 의 차원은 변하더라도,  $\begin{bmatrix} H & p_d \\ 0 & I \end{bmatrix}$ 의 차원은 변하지 않기 때문에 두 개의 부분 자코비안중  $\begin{bmatrix} L & q_d \\ e_k & I \end{bmatrix}$ 만 갱신하면 된다는 것이다. 이 방법을 통해 연속조류계산 수행시 계산량과 계산시간의 단축이 가능해진다.

## 4. 뉴턴-랩슨법으로의 전환

Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템의 단점은 부하가 증가하는 경우에 수렴특성이 떨어지고 심지어 진동 또는 발산하는 경우가 생긴다는 것이다. 이로 인해 생기는 계산시간의 증대를 방지하기 위하여 부하가 어느정도 증부하로 상승할 경우에 Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템에서 뉴턴-랩슨법을 적용한 종래의 연속조류계산 시스템으로의 전환이 필요하게 된다. 즉, 해가 진동 또는 발산하는 경우나, 수렴특성이 떨어지는 경우에 뉴턴-랩슨법을 적용한 연속조류계산 시스템으로 전환되어야 한다.

뉴턴-랩슨법을 적용한 종래의 연속조류계산 시스템은 부하수준이 증가하더라도 수정과정에서 수렴하기 위한 반복 계산 횟수가 크게 증가하지 않는다. 즉 어느 정도 증가된 증부하에서도 수정과정에서 3,4 번 정도의 반복 계산이면 수렴하는 특성을 나타낸다.[5] 따라서 수렴특성이 떨어짐으로 인해 전환이 필요해지는 스텝단계는 다음 식(16)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_d \times T_d \geq 3 \times T_n \quad (16)$$

여기서  $T_d$ ,  $T_n$ ,  $I_d$ 의 의미는 각각 다음과 같다.

$T_d$  : Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템의

수정과정에서 한 번의 반복 계산에 소요되는 시간.

$T_n$  : 뉴턴-랩슨법을 적용한 연속조류계산 시스템의 수

정과정에서 한 번의 반복 계산에 소요되는 시간.

$I_d$  : 한 스텝 전의 단계에서 Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템의 수정과정에서 수렴하는데 소요된 반복계산횟수.

식(16)에서 수렴특성이 떨어짐으로 인한 전환시점의 선택은 결국  $T_d/T_n$ 의 비율을 구하는 것으로 정해진다. 그 비율을 구하기 위해 본 논문에서는 두 가지 방법을 제시한다.

첫 번째 방법은 초기해의 계산에서 뉴턴-랩슨법을 이용함으로써  $T_n$ 을 구한 후, 첫 번째 스텝에서 Decoupled법을 이용함으로써  $T_d$ 를 구하여  $T_d/T_n$ 의 비율을 구하는 방법이 있을 것이다. 그렇게 함으로써 계통의 크기와 종류에 따라서 비교적 정확한  $T_d/T_n$ 의 비율을 계산하여 식(16)에 적용시킬 수 있을 것이다.

두 번째,  $T_d/T_n$ 의 비율을 구하기 위한 다른 방법으로는 그 비율이 계통의 특성에 따라 다른 값을 가질 수도 있지만 그 값을 계통의 크기나 종류에 상관없이 유사한 값을 가진다고 가정해서 구하는 방법이다. 여기서는  $T_d/T_n$ 의 비율의 근사값을 계산하기 위하여 771모선 한 전계통을 가지고 그 값을 구하여 보았다. PC시스템은 펜티엄-3 550Mhz를 사용하였다. 표1에서 계통의 평균적인  $T_n$ ,  $T_d$ 를 계산한 것을 보여주고 있다. 뉴턴-랩슨법을 이용한 연속조류계산 시스템의 경우 전압불안정점까지 실행시켜 반복횟수와 그 소요시간을 구하였다. 그리고, Decoupled법을 이용한 연속조류계산 시스템은 수렴성이 유지되는 순간까지 실행시켜 반복횟수와 그 소요시간을 구하였다.  $T_n$ ,  $T_d$ 의 계산은 각각 소요시간을 반복횟수로

나는 평균값이다. 시간의 단위는 초를 사용하였다.

	반복횟수	소요시간	$T_n$	$T_d$
뉴턴-랩슨법	210	20.43	0.0973	
Decoupled법	320	7.28		0.0228

표1  $T_n, T_d$ 값의 계산

표1의 결과를 통해서  $T_d/T_n$ 의 비율을 구해보면 0.267을 나타내었다. 따라서 식(16)은 다음과 같이 간단하게 바뀐다.

$$I_d \geq 11.24 \quad (17)$$

정리하면, 전 단계의 수정과정에서 수렴하는데 필요한 반복횟수가 11번이 넘었을 경우나 수렴하지 못하고 진동하거나 발산하는 경우 그 이상 Decoupled법을 이용하는 것보다 뉴턴-랩슨법을 이용하는 것이 더 유리해지게 되어 뉴턴-랩슨법을 이용하는 종래의 연속조류계산시스템으로 전환되어야 한다.

### 5. 사례연구

본 논문에서 제안한 Decoupled법과 Enhanced Decoupled법을 적용한 수정된 연속조류계산 시스템을 이용하여 771모선 한전계통의 조류해 경로를 구하여 보았다. PC시스템은 펜티엄-3 550Mhz를 사용하였다. 먼저 뉴턴-랩슨법을 적용한 연속조류계산 시스템을 이용하여 조류해의 경로를 구하였다.(사례1) 그리고, Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템이 뉴턴-랩슨법으로의 전환이 이루어진 경우의 조류해의 경로를 구하였다.(사례2) 마지막으로 Enhanced Decoupled법을 적용한 연속조류계산 시스템이 뉴턴-랩슨법으로의 전환이 이루어진 경우의 조류해의 경로를 구하여 보았다.(사례3) 그리고 속도 향상을 위해 각 사례에 대해서 Dishonest 법을 공통적으로 적용하였다. 본 논문에서는 정전력(constant power)부하모델을 이용하였고 부하증가는 모선의 부하를 일정 역률로 증가시켰다. 또한 전체 부하 증가량을 각 발전기의 초기 발전 분담비에 따라 분담시켜 전력수급조건을 만족시키도록 하고 스텝크기는 고정스텝을 사용하였다. 그리고 초기 부하(A)는 20600[MW]에서 시작되었다. 세 가지 사례에서 조류해의 궤적은 비교할 필요가 없을 만큼 일치했으며 그림2에 83번 도선의 P-V곡선으로 나타내었다. 전압불안정점은 모두 33400[MW]를 나타내었다.

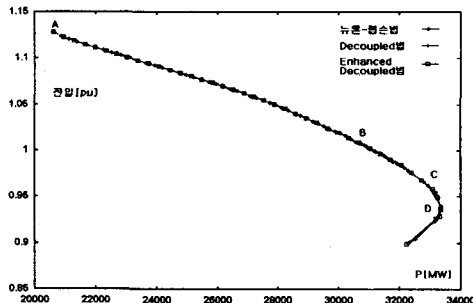


그림2 771모선 한전계통의 P-V곡선

사례2의 Decoupled법을 이용한 연속조류계산 시스템은 부하가 30700[Mw](B)가 되었을 때 뉴턴-랩슨법을 이용한 연속조류계산 시스템으로 전환되었다. 사례3의 Enhanced Decoupled법을 이용한 연속조류계산 시스템은 부하가 33100[MW](C)가 되었을 때 뉴턴-랩슨법을 이용한 연속조류계산 시스템으로 전환되었다. 각 방법의 계산 소요시간을 비교하기 위해 A~B구간(경부하구간), B~C구간(중부하구간, Decoupled법이 사용되지 않은 구간)으

로 나누어 한 스텝의 계산에 소요된 평균계산시간을 세 사례에 대해서 표2와 같이 나타내었다. 그리고, C~D구간은 Enhanced Decoupled법의 수렴성도 떨어지게 되어 세 사례 모두 뉴턴-랩슨법을 적용한 구간이다.

	A~B구간	B~C구간
뉴턴-랩슨법	0.325	0.459
Decoupled법	0.205	
Enhanced Decoupled법	0.186	0.269

표2 한 스텝의 평균계산시간

표2에서 보듯이 뉴턴-랩슨법에 비해 Decoupled법과 Enhanced Decoupled법을 사용한 경우 스텝수와 한 스텝의 계산에 소요된 평균 계산시간은 감소되었다.

세 가지 사례에 대해서 초기해(A)로부터 전압불안정점(D)까지 도달하는 데에 소요된 시간을 각각의 전환점(B,C)까지 도달하는데 소요된 시간과 함께 표2에 나타내었다.

	B	C	D
뉴턴-랩슨법	14.32	19.37	20.43
Decoupled법	5.95	10.77	11.41
Enhanced Decoupled법	5.40	7.28	9.07

표3 연속조류계산 소요시간

전체적인 성능에서 Decoupled법을 이용한 경우 약 11.41초에 전압불안정점에 도달하여 약 9.02초 정도의 계산 소요 시간이 감소되었다. Enhanced Decoupled법을 이용한 경우 약 9.07초에 전압불안정점에 도달하여 약 11.36초 정도의 계산 소요 시간이 감소되었다. 즉 계산 소요 시간이 절반 이상 감소된 효과를 나타내었다. 그리고, 표에서 보듯이 Enhanced Decoupled법을 이용한 경우가 Decoupled법을 이용한 경우보다 좀 더 높은 중부하까지 좋은 수렴성을 유지할 수 있기 때문에 전체 계산 소요 시간이 단축되는 효과가 나타남을 보여준다.

### 6. 결 론

연속조류계산 시스템은 예측과정, 수정과정, 파라미터화, 그리고 스텝크기 선택에 있어 어떤 알고리즘을 사용하느냐에 따라 구분될 수 있다. 본 논문에서는 예측과정과 수정과정에서 종래의 뉴턴-랩슨법을 사용하는 방법 대신, Decoupled법이나 Enhanced Decoupled법을 사용하는 방법을 이용함으로써 연속조류계산 시스템의 성능 향상이 이루어질 수 있음을 제시하였다. 사례연구에서는 771모선 한전계통을 이용하여 조류해의 경로를 추적함으로써 종래의 뉴턴-랩슨법을 사용한 것과 비교하여 보았다.

#### [참고 문헌]

- [1] V. Ajjarapu, C. Christy, "The Continuation Power : A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis" IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, no. 1, pp. 416-423, February 1992
- [2] B. Stott, "Decoupled Newton Load Flows", IEEE T PAS, vol. PAS-91, pp. 1955-1957, September/Oct 1972
- [3] 이승철, 박상수, 박경배, "Decoupled Load Flow 알고리즘에 대한 유용한 알고리즘들의 개발", Trans. KIEE, Vol. 48 No. 12, pp1514-1999, December 1999
- [4] 송화창, 이병준, 권세혁, "실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발", Trans. KIEE, Vol.48A, No. 3, pp190-196, March 1999
- [5] Allen J. Wood "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, Inc. 1996