

송길영	최상규	황문백
고려대학교	고려대학교	한국전력공사

A study on Fast Decoupled Load Flow Algorithm
using the decoupling technique via linear transformation

Kil-Yeong Song	Sang-Geu Choi	Moon-Baeg Hwang
KOREA Univ.	KOREA Univ.	KEPCO

Abstract

The algorithm presented here achieves mathematically better decoupling of the MW-θ and MVAR-E Calculations by applying linear transformations to load flow equation on paired initial power.

The linear transformations to decouple Jacobian matrix prove to be highly profitable considering both Convergence characteristics and computation time per iteration to those required by the FDLF, because the decoupling does not rely on the assumption that the transmission lines have high X/R ratios.

1. 서론

전력계통의 운용상태 파악을 비롯하여 이상상태에 대한 원인분석 및 사고예방 대책의 입안등에 쓰이는 전력조류계산은 부하변동이 시시각각으로 발생하므로 컴퓨터 계산 소요시간을 단축시키면서 신뢰성은 향상되고 기억용량은 줄일 수 있는 알고리즘 개발이 요구되고 있다.

뉴턴 램슨 조류계산법(N-R법)⁽⁵⁾은 신뢰성은 우수하나 계산 소요시간과 기억용량면에서 만족할 만한 결과를 주지 못하는 단점이 있다.

또한 고속분할 조류계산법(FDLF)⁽³⁾은 기억용량과 계산 소요시간면에서는 N-R법보다 우수하나 X/R 비율이 낮은 선로가 포함된 약조건(ill-condition)^(2,4)계통에 대해서는 수렴특성이 크게 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 이 FDLF의 단점을 보완할 수 있는 알고리즘 개발에 역점을 두고 최근에 상태추정분야에서 개발된 바 있는 선형변환분할기법⁽¹⁾을 도입하여 1차적으로 자코비안 행렬의 비대각블럭을 0에 가깝게 가져다 준 다음 MW-θ와 MVAR-E를 분할시킴으로써 X/R 비율이 낮은 선로가 포함된 약조건 계통에 대해서도 우수한 신뢰성과 수렴특성을 갖는 새로운 전력조류계산법을 개발하고 IEEE-14 모선모델 계통에 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

2. 고속분할 조류계산법

뉴턴 램슨 조류계산법으로 유도된 아래의 반복계산식(2-1)

$$\begin{bmatrix} P^{sp} \\ Q^{sp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P/\partial \theta & \partial P/\partial E \\ \partial Q/\partial \theta & \partial Q/\partial E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E/E \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$h^{sp} - h(X) = J \cdot \Delta X \quad (2-2)$$

여기서

$$h^{sp} = \begin{bmatrix} P^{sp} \\ Q^{sp} \end{bmatrix} \quad h(X) = \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \partial P/\partial \theta & \partial P/\partial E \\ \partial Q/\partial \theta & \partial Q/\partial E \end{bmatrix} \quad \Delta X = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E/E \end{bmatrix}$$

에서 고속분할 조류계산법은 MW-θ와 MVAR-E의 遊離한 물리적 성질을 이용하여 반복계산식(2-1)의 비대각 블럭을 0으로 가정해서 다음과 같이 수정 방정식을 유도할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P^{sp} \\ Q^{sp} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P(X) \\ Q(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial P/\partial \theta & 0 \\ 0 & \partial Q/\partial E \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E/E \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

한편, 실계통에서는 다음과 같은 가정

$$\cos \theta_{pq} \approx 1, G_{pq} \sin \theta_{pq} \ll B_{pq}, Q_p \ll B_{pp}, E^2$$

이외도 여러가지 성질을 살려서 다음과 같이 훨씬 간략화시킬 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P^{sp}/E \\ Q^{sp}/E \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P(X)/E \\ Q(X)/E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B^* & 0 \\ 0 & B^* \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

이때 서셉턴스 행렬 [B*], [B*]는 정수행렬이므로 조류계산시 한번만 구해 놓으면 다시 계산하지 않고 계속 사용할 수 있는 이점이 있으며 X/R 비율이 큰 호조건 계통에서는 수렴특성이 좋으나 Jacobian 행렬의 비대각 블럭요소들을 무조건 무시하고 분할하였기 때문에 X/R 비율이 작은 선로가 포함된 약조건 계통에 대해서는 수렴특성이 저하되는 단점이 있다.

3. 선형변환 고속분할 조류 계산법

3.1 선형변환 개념

선형변환이란 다음식(3-1)과(3-2)을 만족시키는 변환을 말하며, T:V→W가 벡터공간 V를 벡터공간 W속으로 사상시키는 함수라면

i) V내에 있는 모든 벡터 u와 v에 대하여

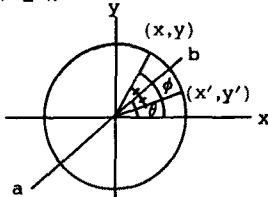
$$T(u+v) = T(u) + T(v) \quad (3-1)$$

ii) V내에 있는 모든 벡터와 모든 실수 k에 대하여

$$T(ku) = kT(u) \quad (3-2)$$

가 된다.

따라서 반지름 r인 원주상에서 x-y평면상의 한점 (x,y)을 변환행렬 A를 통하여 선형변환시키면 그림 (3-1)에서 (x',y')으로 이동하게 된다.



(그림 3-1)

이것을 식으로 나타내면 다음식 (3-3)을 얻을 수 있다.

$$A = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix}$$

$$T(v) = AV = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

3.2 대리 전력 방정식

i) 유효모선 주입 전력 방정식

$$P_p = E_p \sum_{q=1}^N [(G_{pq} \cos\theta_{pq} + B_{pq} \sin\theta_{pq}) E_q] \quad (3-4)$$

ii) 무효모선 주입 전력 방정식

$$Q_p = E_p \sum_{q=1}^N [(G_{pq} \sin\theta_{pq} - B_{pq} \cos\theta_{pq}) E_q]$$

로부터 전압크기 E_p, E_q 및 위상각 θ_p, θ_q 에 대한 각각의 편미분 방정식을 구하여 정리하면 다음과 같이 2행 4열의 자코비안 행렬을 얻을 수 있다.

	J	J			
h(x)		$\Delta\theta_p$	ΔE_p	$\Delta\theta_q$	ΔE_q
P_p		$\sum B_{pq}$	$\sum G_{pq} + 2G_{pp}$	$-B_{pq}$	G_{pq}
Q_p		$\sum G_{pq}$	$-\sum B_{pq} - 2B_{pp}$	$-G_{pq}$	$-B_{pq}$

(3-5)

식 (3-5)의 각열은 상호직교하므로 P, Q 로 정의된 평면상의 단순한 회전을 통하여 두 자코비안 행을 거의 완전하게 분할할 수 있으므로 식 (3-3)으로부터 모선 P에 유입되는 대리 유효, 무효 전력 방정식 $P_{s,p}$ 와 $Q_{s,p}$ 을 다음식 (3-6)과 같이 만들 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{s,p} \\ Q_{s,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{b1} & T_{b2} \\ T_{b2} & -T_{b1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_p \\ Q_p \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

따라서 MW- θ 와 MVAR-E의 분할은 식 (3-6)에서 한쌍의 대리 유효, 무효 전력방정식 (Surrogate Active & Reactive Power equation)의 변화량 ΔP_s 와 ΔQ_s 가 각각 $\Delta\theta$ 와 ΔE 에 대해 완전히 좌우되도록 변환행렬(Transformation Matrix) T의 요소인 T_{b1} 과 T_{b2} 를 선정하는 문제로 귀착된다.

3.3 변환 행렬 T

모선 P에 주입되는 대리 모선 주입전력방정식의 변화량 $dP_{s,p}$ 와 $dQ_{s,p}$ 의 분할을 위한 T_{b1} 과 T_{b2} 의 결정은 다음식 (3-7)

로 결정할 수 있다.

$$C_p = \sum_{q=1}^N [(\frac{\partial P_{s,p}}{\partial E_p} / \frac{\partial E_q}{\partial E_p})^2 + (\frac{\partial Q_{s,p}}{\partial \theta_p} / \frac{\partial \theta_q}{\partial \theta_p})^2] \quad (3-7)$$

윗식 (3-7)의 의미는 자코비안 행렬 J의 비대각 블록요소의 값이 대각블록요소의 값에 비하여 상대적으로 얼마만큼 작은가 하는 척도를 가리키는 것이므로 기준전압상태 ($E=1, \theta=0$)에서 전압크기 E_p, E_q 및 위상각 θ_p, θ_q 에 대한 편미분 값을 구하여 식 (3-7)에 대입하면

$$C_p = 2 \left(\sum_{q=1}^N \cotan^2(\theta_{pq} + \phi) + \cotan^2(\theta_{pp} + \phi) \right)$$

$$= 2[C+1] \cotan^2(\theta_{pp} + \phi) \quad (3-8)$$

여기서

$$\theta_{pq} = \tan^{-1}(B_{pq}/G_{pq}) \quad \phi = \tan^{-1}(T_{b2}/T_{b1})$$

가 되어 C_p 는 $\theta_{pp} + \phi = T/2$ 일때 최소가 되므로

$$T_{b1} = B_{pp} \quad T_{b2} = G_{pp} \quad (3-9)$$

로 됨을 알 수 있다.

3.4 선형변환 고속분할 조류계산법의 정식화

기준전압상태에서 대리 자코비안 행렬을 정리하면 다음과 같다.

	$J_s(X)$	$J_e(X)$			
$h_s(X)$		$\Delta\theta_p$	ΔE_p	$\Delta\theta_q$	ΔE_q
$P_{s,p}$		$B_{pp}\sum E_{pq} + G_{pp}\sum G_{pq}$	0	$-(B_{pp}B_{pq} + G_{pp}G_{pq})$	0
$Q_{s,p}$		0	$G_{pp}^2 + B_{pp}^2$	0	$B_{pp}B_{pq} + G_{pp}G_{pq}$

(3-10)

윗식 (3-10)으로부터 대리 자코비안 행렬의 비대각블록요소들은 0이거나 0에 가깝게 된다는 것을 알 수 있으므로

$$J_s = \begin{bmatrix} H_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix}$$

여기서

$$H_s = \partial P_s / \partial \theta \quad L_s = \partial Q_s / \partial E$$

가 되어 결국

$$\begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_s \\ \Delta L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_s \\ \Delta Q_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_s \\ \Delta L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta E \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

를 반복계산한다는 것을 의미한다.

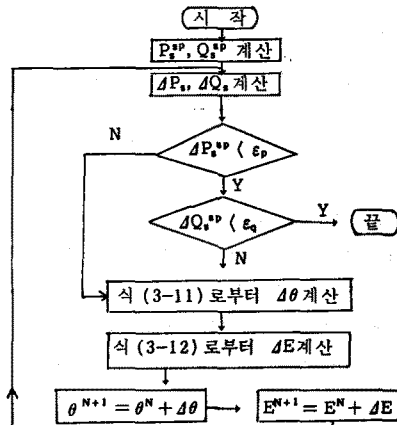


그림 3.2 선형변환 고속분할 조류계산법의 흐름도

4. 모델 계통에 대한 적용에

본 논문에서 제안한 알고리즘의 효용성을 입증하기 위하여 IEEE-14 모선 모델계통에 적용하여 그 결과를 검토하였다.

표 1을 통하여 본연구에서 제시한 방법의 1회 반복 계산시간이 FDLF 방법보다 다소 빠름을 알 수 있다.

표 2에서는 본방법이 FDLF 방법에 의한 반복계산횟수보다 1/2로 줄어들음을 알 수 있고 반복횟수가 줄어든 만큼 전체계산소요 시간은 단축된다.

표 3은 $X/R = 0.75$ 인 약조건 선로 갯수가 증가할 경우 종래의 고속분할 조류계산법에 의한 반복계산횟수는 증가하는데 반해 본 방법은 약조건의 영향을 별로 받지 않음을 알 수 있다.

표 1. IEEE-14 모선모델 계통에 대한 각 방법의 1회 반복계산시간의 비교 [단위: 초]

모델계통	14-B
조류계산법	
고속분할 조류계산법	0.6333
선형변환 고속분할 조류계산법	0.5333

표 2. IEEE-14 모선모델 계통에 대한 수렴특성 비교 ($\epsilon = 10^{-4}$)

조류계산법	반복계산 횟수	반복계산 시간
고속분할 조류계산법	10 회	6.333 초
선형변환 고속분할 조류계산법	5 회	2.667 초

표 3. IEEE-14 모선 모델 계통에 대한 $X/R=0.75$ 인 선로의 갯수 증가에 따른 수렴특성 비교 [$\epsilon = 10^{-4}$]

$X/R=0.75$ 선로갯수	고속분할 조류계산법	선형변환 고속분할 조류계산법
1	14 회	5 회
2	18 1/2 회	9 회
3	수렴불가	9 회
4	수렴불가	10 회

5. 결 론

본 연구에서 제시한 알고리즘을 IEEE-14 모델 계통에 적용해 본 결과

1. X/R 비율이 낮은 선로가 포함된 계통에 대하여 종래의 FDLF 방법은 수렴이 대폭 늦어지는 것과 달리 본 연구에서 제시한 알고리즘은 X/R 비율이 큰 호조건[well-condition] 계통에 대해서는 물론이고 X/R 비율이 낮은 선로가 포함된 약 조건 계통에 대해서도 우수한 수렴특성을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

2. 본 연구에서 제시한 알고리즘을 온-라인 전압-무효전력 제어분야에 적용할 경우 좋은 결과가 얻어질 것으로 생각되며 그 밖에 다른분야에도 본 방법의 사용가능성을 연구해 볼 필요가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Fulin Zhuang, "A transformation-decoupled estimator for power system state estimation", IEEE Trans., vol. PAS-104, No.7, July 1985.
2. Paul H. Haley & Mark Ayres, "Super decoupled loadflow with distributed slack bus", IEEE Trans., vol. PAS-104, No.1, January 1985.
3. B. Stott & O. Alsac, "Fast decoupled load flow", IEEE Trans., vol. PAS-93, pp.859-869, May/June 1974.
4. 岩本伸一 & 中西要祐 & 田村康男, "惡條件下電力系統の對する潮流計算法", 일본전기학회논문집, Feb 1980.
5. W. Tinney & C.E.Hart, "Power flow solution by Newton's method", IEEE Trans., PAS-86, pp.1449-1460, Nov. 1967.