

Decoupled Load Flow 알고리즘의 유연한 대안 알고리즘들의 개발에 관한 연구

이승철
중앙대학교 전기공학과 대학원

Development of Alternative Algorithms to the Decoupled Load Flow

S. C. Lee Sang-Soo Park
Department of Electrical Engineering, Chung-Ang University

Abstract - 본 논문에서 제안된 조류계산 알고리즘은 Jacobian의 off-diagonal 부 행렬을 완전히 무시하는 Decoupled Load Flow(DCL) 알고리즘들의 유연한 대안으로 반복(iteration)당 최소한의 추가 계산 부담으로 Jacobian의 off-diagonal 부분의 효과를 부분적으로 반영함에 의해 수렴 특성을 향상시킬 수 있다. 제안된 방법들은 특히 Fast Decoupled Load Flow(FDL)로 대표되는 DCL들의 수렴특성이 불안정해질 경우, 효과적으로 수렴특성을 향상시킬 수 있다. 제안된 알고리즘들은 Newton-Raphson Load Flow(NRL) 방법에서 Jacobian의 off-diagonal 부분의 효과를 점진적으로 제거하는 방법으로 유도하였고, 간략화 과정에서는 Neuman series expansion을 사용하였다. 실험결과 제안된 알고리즘들은 반복횟수와 전반적인 수렴 속도에서 확실한 성능향상을 보여주었다. 제안된 알고리즘들은 특히 DCL의 수렴성능이 문제가 있을 시 full NRL 대신에 적용할 수 있는 가능성이 있어 조류계산 시간을 단축해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

전력 시스템이 정상적인 상태로 운전시, Decoupled Load Flow(DCL)[1] 혹은 Stott and Alsac에 의해 제안된 Fast Decoupled Load Flow(FDL)[2] 알고리즘이 가장 효과적인 전력 조류계산 도구로 사용되어져 왔다. 그러나, DCL 또는 FDL은 때때로 심각한 우발사고(contingency)가 발생될 때와 같은 경우에는 과다한 반복횟수가 요구되거나 수렴이 어렵게 되는 경우가 발생할 수 있다. 이 때는 계산시간은 비록 많이 걸리지만 안정된 수렴특성을 보이는 NRL[3]을 대신 사용하게 된다.

전력 시스템에 부하가 과중하게 걸리거나 혹은 큰 교란이 있을 때는 무효전력과 전압 위상과 그리고 유효전력의 크기와의 coupling이 중요하게 된다. 더욱이 전력 시스템이 여러 개의 높은 R/X 비를 가진 송전선이 있게 되면, nodal 어드미턴스 각이 커지게 되고, 그 결과로서 Jacobian 행렬의 off-diagonal 부 행렬의 중요도가 증가하게 된다. 따라서, 이때 FDL 혹은 DCL 알고리즘에서와 같이 Jacobian 행렬의 off-diagonal 부 행렬을 완전히 무시하게 되면 수렴성이 떨어지게 된다[4]. 높은 R/X 비율의 송전선들을 가지고 있는 시스템에서 FDL의 수렴성능을 향상시키기 위해 series and parallel compensation[5], super-decoupling[6], 그리고 B' 행렬의 조정[7]과 같은 여러 가지 기술들이 제안되어 왔다. 그러나 이 같은 기술들은 시스템의 구조에 따라 조정이 필요하거나 혹은 시스템 구조의 변형이나 전력 조류식의 rotation과 같은 각 경우에 따른 보정이 요구된다. 최근에는 FDL의 B'와 B''에서의 저항값을 무시하는 기술이 제안되어 FDL이 적용될 수 있는 시스템의 범위를 얼마간 확대하게 되었다[8].

본 논문에서는 FDL 혹은 매 반복시마다 Jacobian 부 행렬을 재산하는 DCL이 P-Q coupling이 강해짐에

따라 반복횟수와 전체 계산 시간이 현저하게 늘어날 경우에, DCL의 수렴 특성을 향상시킬 수 있는 두 조류계산 알고리즘을 제안하였다.

제안된 알고리즘을 the Enhanced Decoupled Load Flow(EDCL)과 the Simplified Newton-Raphson Load Flow(SNRL)라고 명명하였다. 제안된 알고리즘들은 Jacobian의 off-diagonal 부 행렬의 효과를 점진적으로 줄여 가기 위해 full NRL에서 state update 벡터 표현을 단계적으로 근사화 시킴에 의해 얻어진다. 간략화는 Neuman series expansion에 기초를 두고 진행되었다. 제안된 알고리즘들은 국내의 733-bus 시스템에서 테스트하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 알고리즘

전력 시스템이 정상 상태일 때 각 모선에서 송전선으로 유입되는 전력은 다음과 같은 비 선형 결합(coupled) 대수식으로 표현되어 질 수 있다.

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \operatorname{Re} \left(V_i \sum_j Y_{ij} V_j \right) = |V_i| \sum_j Y_{ij} |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (1)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = -\operatorname{Im} \left(V_i \sum_j Y_{ij} V_j \right) = -|V_i| \sum_j Y_{ij} |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (2)$$

여기서,

P_i, Q_i : 모선 i 에서 연결 송전선으로 유입되는 유효, 무효 전력

P_{gi}, Q_{gi} : 모선 i 에서의 유효, 무효 전력 발전량

P_{di}, Q_{di} : 모선 i 에서의 유효, 무효 전력 부하량

$|V_i| \angle \delta_i$: 모선 i 에서의 complex 전압

$|Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$: 모선 어드미턴스 행렬의 i, j 번째 원소

식(1)과 (2)로부터 모선 i 의 power mismatch는 다음과 같이 나타내 질 수 있다.

$$F_{gi} = P_{gi} - P_{di} - \sum_j V_i |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (3)$$

$$F_{di} = Q_{gi} - Q_{di} - \sum_j V_i |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (4)$$

$i, j = 1, 2, \dots, n$

상기 식들로부터 상태 변화에 따른 solution point에서의 모선 전력 mismatch 벡터는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_p \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_p}{\partial X_1} & \frac{\partial F_p}{\partial X_2} \\ \frac{\partial F_q}{\partial X_1} & \frac{\partial F_q}{\partial X_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & K \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} X_1 &= [\delta_2 \delta_3 \dots \delta_n]^T \\ X_2 &= [Q_2 Q_3 \dots Q_n | V_{n+1} | \dots V_n]^T \end{aligned} \quad (6)$$

이고, g 는 발전기 전체의 개수를 말한다. X_2 에서 Q_1 부터 Q_g 까지는 생략될 수 있으나, 발전기가 그들의 Q limit에 도달하여 전압제어모션이 부하모션으로 바뀌어도 Jacobian의 크기를 일정하게 유지하기 위하여 포함시켰다. K 와 L 에서 해당되는 열은 간단하게 1이 되므로 실질적으로 더 이상의 추가 계산이 필요하지 않게 된다. 또 다른 대안적인 표현은 ΔX_2 에서 $|\Delta V|$ 를 $|\Delta V|/|V|$ 로 대치하고, K 와 L 을 상응하게 바꿔줌에 따라 얻어질 수 있다.

식 (5)로부터,

$$\Delta P = H \Delta X_1 + K \Delta X_2 \quad (7)$$

$$\Delta Q = J \Delta X_1 + L \Delta X_2 \quad (8)$$

이다.

식(7)과 (8)의 양변에 H^{-1} 과 J^{-1} 을 각각 곱해주면,

$$H^{-1} \Delta P = \Delta X_1 + H^{-1} K \Delta X_2 \quad (9)$$

$$J^{-1} \Delta Q = \Delta X_1 + J^{-1} L \Delta X_2 \quad (10)$$

식(9)에서 식(10)을 빼주어 ΔX_2 에 관하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \Delta X_2 &= (H^{-1} K - J^{-1} L)^{-1} (H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q) \\ &= [-J^{-1} L \{ I - (J^{-1} L)^{-1} H^{-1} K \}]^{-1} (H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q) \\ &= -(I - (L^{-1} J H^{-1}) K)^{-1} L^{-1} J (H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q) \\ &= -(I - (L^{-1} J H^{-1}) K)^{-1} (L^{-1} J H^{-1} \Delta P - L^{-1} \Delta Q) \end{aligned} \quad (11)$$

이 된다.

식(9)를 ΔX_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta X_1 = H^{-1} (\Delta P - K \Delta X_2) \quad (12)$$

2.1 Simplified Newton-Raphson Load Flow(SNRL) 알고리즘

식 (11)에서, $(L^{-1} J H^{-1}) K$ 의 spectral radius가 1보다 작다는 가정 아래 Neuman series expansion을 이용하여 다음과 같이 근사화 시킬 수 있다.

$$\Delta X_2 = -(I + (L^{-1} J H^{-1}) K)(L^{-1} J H^{-1} \Delta P - L^{-1} \Delta Q) \quad (13)$$

식(13)은 외연상으로는 많은 계산을 요구하는 듯이 보이지만, H 와 L 의 LU decomposition을 한번 만들어 주면, ΔX_2 는 연속적으로 벡터를 matrices에 postmultiply함으로서 계산되어 질 수 있다. 식의 표현에서 off-diagonal 부 행렬 K 와 J 가 각각 ΔX_2 의 계산에 비교적 잘 반영되어 있음을 알 수 있다. 그리고, ΔX_1 은 식(12)에서 보여진 바와 같이 ΔX_2 를 포함하기 때문에, 반복당 최소한의 추가 계산 부담으로 이러한 반영의 이점을 가질 수 있다.

결과적으로, 식(12)와 (13)을 사용해서 전체 계산 시간에서 NRL보다 적은 FLOP으로 state update 벡터를 안정적으로 계산할 수 있었다. 본 논문에서, 식(12)와 함께 식(13)을 the Simplified Newton-Raphson

Load Flow(SNRL)라 명명하였다.

2.2 Enhanced Decoupled Load Flow (EDCL) 알고리즘

식(13)으로부터, 만약 $(L^{-1} J H^{-1}) K$ 의 norm이 충분하게 작다면, $\{I + (L^{-1} J H^{-1}) K\}$ 은 단위 행렬에 가깝게 되고, 식(13)은 다음과 같이 간략화되어 질 수 있다.

$$\Delta X_2 = -L^{-1} J H^{-1} \Delta P - L^{-1} \Delta Q \quad (14)$$

식(14)로부터 다시 $L^{-1} J H^{-1} \Delta P$ 를 무시하면

$$\Delta X_2 = L^{-1} \Delta Q \quad (15)$$

만약, J 가 K 보다 더 중요하게 간주된다면, 식 (15)는 다음과 같이 ΔX_2 에 관하여 정리가 된다.

$$\Delta X_2 = L^{-1} (\Delta Q - J \Delta X_1) \quad (16)$$

식(15)와 함께 식(12)는 반복횟수와 수렴속도 양쪽에서 DCL보다 우수한 수렴 성능을 보여주었다. 이를 식(12)와 (15)를 이용한 조류계산법을 the Enhanced Decoupled Load Flow(EDCL)라 명명하였다.

3. 모의 실험 결과

제안된 알고리즘을 테스트하기 위해 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 알고리즘들은 국내의 733-BUS 시스템을 사용하여 테스트하였다. R/X 비율에 연관된 $(L^{-1} J H^{-1}) K$ 의 중요성을 시험하기 위하여, R-Scale Factor를 이용하여, 평균 R/X 비율을 변화시켜 가며 테스트하였다. 이러한 국내 733-bus 시스템에서의 테스트 결과를 표 1에 나타내었다. 표 1에서 제안된 두 알고리즘인 EDCL과 SNRL을 DCL, NRL 알고리즘과 비교하였다. 또한 수렴에 요구되는 반복 횟수와 전체 floating-point operations (FLOPs)의 수를 표에 나타내었다.

표 1. 733-Bus 시스템에서의 모의 실험 결과
(전체 부하 크기 : 36,093MW)

R-Scale Factor	R/X ratio (AVG)	반복횟수와 전체 FLOP수			
		NRL	SNRL	EDCL	DCL
0.6	0.0597	4	6	7	20
		2040226.8	351455.1	334096.0	1041861.4
0.8	0.0797	4	7	8	22
		2040876.7	404658.3	387000.6	1146048.9
*1.0	0.0996	4	7	8	22
		2040799.8	404658.3	387000.6	1146048.9
1.2	0.1195	5	8	9	24
		2550288.0	457861.5	439905.2	1250236.4
1.4	0.1394	5	9	9	30
		2552044.0	516405.7	439877.2	1562668.5
1.57	1.1563	**NC	NC	13	NC
				651472.3	

* : The original case

** : Not Converge

Flops의 수는 MATLAB에 있는 flops()함수를 이용하여 측정하였고, H^{-1} 과 L^{-1} 을 포함하는 계산은 MATLAB에서 LU decomposition 방법과 연속적인 벡터 postmultiplication 방법으로 수행되었다.

테스트 결과 R-Scale Factor가 증가할수록 EDCL이 DCL보다 더 좋은 성능을 보여 주었으며, R-Scale Factor가 1.57인 경우, EDCL 알고리즘만이 수렴에 성공하였으며 나머지 알고리즘들은 수렴에 실패함을 볼 수 있었다.

표 1에서 *로 표시된 국내의 733-Bus 시스템의 기본(original) 경우의 유효와 무효 전력의 mismatch에 대한 수렴 특성을 그림 1과 2에 나타내었다. ΔP 의 경우, EDCL의 수렴 특성이 가장 좋고, 다음으로 SNRL이 그 뒤를 따르고 있다. 그림 2의 ΔQ 의 경우에는 EDCL이 SNRL 보다 약간 나은 경향을 보이고 있다. DCL은 ΔQ 의 경우에도 수렴과정에서 진동을 보여주고 있다.

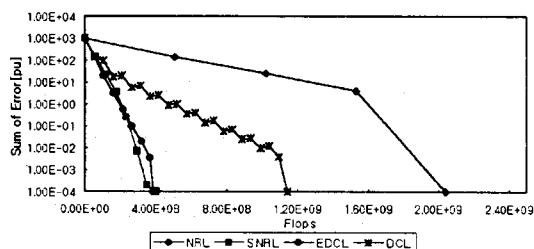


그림 1. 733-Bus 시스템에서의 ΔP 의 수렴특성

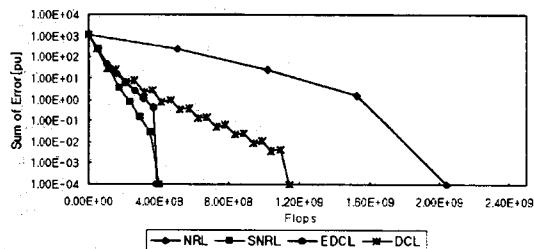


그림 2. 733-Bus 시스템에서의 ΔQ 의 수렴특성

4. 결 론

본 논문에서는 EDCL과 SNRL이라 명명한 두 조류 계산 알고리즘들을 제안하였다. 제안된 알고리즘들은 정상적인 계산 상태뿐만 아니라 Jacobian의 off-diagonal 부 행렬을 완전히 무시하는 DCL 또는 FDL의 수렴에 문제가 있는 경우에도 그 대안으로 사용되어 질 수 있다. 시험 계통에서 EDCL은 여타 알고리즘과 비교해 가장 나은 수렴 특성을 보여 주었다. 또한 SNRL의 경우는 반복 횟수는 NRL 알고리즘과 비슷하나 반복횟수당 FLOPs수는 훨씬 적으므로, EDCL이나 DCL이 수렴에 어려움이 있을 때, NRL의 대안으로 사용할 수 있는 가능성을 보여 주었다.

본 연구는 중앙대학교 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

1972.

- [2] B. Stott and O. Alsa, "Fast Decoupled Load- Flow", IEEE Trans., PAS, Vol. 93, pp. 859, 1974.
- [3] Tinney, W.F., C.E. Hart, "Power Flow Solution by Newtons Method", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS- 86, pp. 1449-1460, 1970.
- [4] Wu, F. F., "Theoretical Study of the Convergence of the Fast Decoupled Loadflow", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-96, pp. 268-275, 1977.
- [5] Deckmann, S., A. Pizzilante, A. Monticelli, B. Stott, O. Alsa, "Numerical Testing of Power System Load Flow Equivalents", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-99, pp. 2292-2300, 1980.
- [6] Haley, P.H., M. Ayres, "Super Decoupled Loadflow with Distributed Slack Bus", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-104, pp. 104-113, 1985.
- [7] Rajicic, D., A. Bose, "A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X ratios", Proceedings of the PICA Conference 1987, pp. 360-363.
- [8] Robert A.M. van Amerongen, A General-purpose Version of the Fast Decoupled Loadflow, IEEE Trans., PAS, Vol. 4, No. 2, pp. 760-770, May 1989.

(참 고 문 헌)

- [1] B. Stott, "Decoupled Newton load flows", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-91, pp. 1955-1957, September / October