

Decoupled Load Flow 알고리즘에 대한 유용한 대안 알고리즘들의 개발

論 文

48A-12-6

Development of Alternative Algorithms to the Decoupled Load Flow

李承哲* · 朴祥秀** · 朴京培**

(Seung-Chul Lee · Sang-Soo Park · Kyung-Bae Park)

Abstract - This paper presents two flexible alternatives to the decoupled load flow(DCL) method. The proposed load flow methods can improve the convergence profiles of the DCL by reflecting in part the effects of the off-diagonal terms in the Jacobian at minimal costs. They can improve the convergence characteristics especially when the power system operating states deviate from the conditions required for stable convergence of the DCL and the P-Q coupling becomes significant. Two algorithms are obtained from the expression of the full Newton-Raphson load flow (NRL) method by successively diminishing the effects of the off-diagonal submatrices in the Jacobian. In the process of simplification, the Neuman series expansion is utilized. Test results show promising performances of the proposed algorithms in their convergence characteristics both in number of iterations and overall convergence speeds. Proposed algorithms are expected to provide flexible alternatives to the NRL when the DCL experiences convergence problems.

Key Words : Enhanced Decoupled Load Flow, Simplified Newton-Raphson Load Flow, Jacobian Submatrices, Convergence Characteristics, R/X ratios

1. 서 론

전력 시스템이 적절한 전압 크기와 작은 위상각을 가지고 정상적인 부하가 걸려있을 때는 Decoupled Load Flow(DCL) [1] 혹은 Stott and Alsac에 의해 제안된 Fast Decoupled Load Flow(FDL)[2] 알고리즘이 그 빠르고 강력한 수렴 특성으로 인해 가장 효과적인 전력 조류계산 도구로 사용되어져 왔다. 그러나, DCL 또는 FDL은 전력 시스템에 심한 중부하나 경부하가 걸릴 때, 몇몇 송전선이 높은 R/X 비를 가질 때, 또는 심각한 우발 사고(contingency)가 발생될 때와 같은 경우에는 과도한 반복계산(iteration)이 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 위상각 그리고 유효전력과 전압 크기와의 결합(coupling)이 중요하게 된다. 더욱이 전력 시스템에 여러 개의 높은 R/X 비를 가진 송전선이 있게되면, nodal 어디미턴스 각이 커지게 되고, 그 결과로서 Jacobian 행렬의 비 대각 부 행렬(off-diagonal submatrices)의 중요도가 증가하게 된다. 따라서, 이때 FDL 혹은 DCL 알고리즘에서

와 같이 Jacobian 행렬의 비 대각 부 행렬을 완전히 무시하게 되면 수렴성이 떨어지게 된다[4]. 높은 R/X 비율의 송전선들을 가지고 있는 시스템에서 FDL의 수렴성능을 향상시키기 위해 직 병렬 보상(series and parallel compensation)[5], super-decoupling[6], 그리고 B' 행렬의 도입[7]과 같은 여러 가지 기술들이 제안되어 왔다. 그러나, 이 같은 기술들은 시스템의 구조에 따라 조정이 필요하거나 혹은 시스템 구조의 변형이나 전력 조류 식의 rotation과 같은 각 경우에 따른 보정이 요구된다. 최근에는 FDL의 B' 과 B'' 에서의 저항 값을 달리 취급하는 기술이 제안되어 FDL이 적용될 수 있는 시스템의 범위를 얼마간 확대하게 되었다[8].

본 논문에서는 FDL 혹은 매 반복계산 때마다 Jacobian 부 행렬을 갱신하는 DCL이 P-Q 결합이 강해짐에 따라 반복계산 횟수와 전체 계산 시간이 현저하게 늘어날 경우에, DCL의 수렴특성을 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 비 대각 부 행렬의 효과를 점진적으로 줄여 가기 위해 full NRL에서 상태(state) update 벡터 표현을 단계적으로 근사화시킴에 의해 얻어진다. 간략화는 Neuman series expansion에 기초를 두고 진행되었다. 유도하는 과정에서, Medanic과 Abramovic에 의해 제안된 ϵ -coupling load flow 방법[9]도 다른 측면에서의 접근 방법으로 얻어질 수 있었다. 제안된 알고리즘들은 New England 39-bus 시스템과 IEEE 118-bus 시스템에서 테스트하였다. 제안된 두 개의 조류계산 알고리즘들은

* 正 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

** 準 會 員 : 中央大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 1999年 9月 16日

最終完了 : 1999年 11月 19日

DCL과 비교 할 때 반복계산 당 미미한 계산 증가와 함께 전체적으로는 보다 빠르고 안정적인 수렴 특성을 나타내었다. 제안된 알고리즘의 이점은 본래 상태보다 R/X 비율을 증가시킬수록 더 커지는 것으로 나타났다. SNRL의 전체 반복계산 횟수는 NRL과 거의 비슷한 수준이었고, 반복계산 당 Floating Point Operation(FLOP)수는 SNRL이 훨씬 적어 전체 계산시간은 SNRL이 NRL보다 빠르게 나타났다. 특히, EDCL은 대부분의 경우 여타 알고리즘들보다 우수한 수렴 특성을 보여주었다.

2. 제안된 알고리즘

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

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

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

여기서,

- P_i, Q_i : 모선 i 에서 연결 송전선로로 유입되는 유효, 무효전력
- 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 복소 전압
- $|Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$: 모선 어드미턴스 행렬의 i, j 번째 원소

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

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

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

상기 식들로부터 상태 변화에 따른 해점(solution point)에 서의 모선 전력 mismatch 벡터는 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

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

여기서,

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

이고, g 는 발전기 전체의 개수를 말한다. X_2 에서 Q_2 부터

Q_g 까지는 J 를 square 행렬로 만들어 주기 위해 포함시켰으며, 이때 만일 발전기 i 가 Q 한계점에 도달하여 전압제어모 선에서 부하모선으로 바뀌면 해당 Q_i 는 $|V_i|$ 로 바뀌고 Jacobian의 크기는 일정히 유지된다. 이때, K 와 L 에서 해당 되는 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 대체하고, K 와 L 을 상응하게 바뀌춤에 따라 얻어질 수 있다.

식 (5)로부터,

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

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

2.1. jacobian 부 행렬에서 상태 update 벡터 표현

식(7)에서 부 행렬 K 는 행 전체가 0인 행들이 존재하게 되어 singular이고 따라서, 역 행렬을 가지지 않게 된다. 그러나, J 는 F_{gi} 가 δ_i 항(term)을 가지므로 대각요소들이 0이 아니고, 따라서 nonsingular하다.

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 빼주게 되면 다음 식이 만들어진다.

$$H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q = (H^{-1} K - J^{-1} L) \Delta X_2 \quad (11)$$

식 (11)로부터, K 로 인해 $H^{-1} K$ 가 singular가 되어도, $J^{-1} L$ 이 nonsingular이기 때문에, $(H^{-1} K - J^{-1} L)$ 는 nonsingular가 된다. ΔX_2 에 관하여 풀면,

$$\begin{aligned} \Delta X_2 &= (H^{-1} K - J^{-1} L)^{-1} (H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q) \\ &= [-J^{-1} L \{ I - (J^{-1} L)^{-1} H^{-1} K \}]^{-1} (H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q) \\ &= -\{ I - (L^{-1} J H^{-1}) K \}^{-1} L^{-1} [H^{-1} \Delta P - J^{-1} \Delta Q] \\ &= -\{ I - (L^{-1} J H^{-1}) K \}^{-1} (L^{-1} J H^{-1} \Delta P - L^{-1} \Delta Q) \end{aligned} \quad (12)$$

이 된다.

식(9)를 ΔX_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\Delta X_1 = H^{-1} (\Delta P - K \Delta X_2) \quad (13)$$

2.2. Simplified Newton-Raphson Load Flow(SNRL) 알고리즘

식 (12)에서, 대부분의 계산은 연속적으로 벡터를 행렬의 뒤에서 곱함에 의해(postmultiplication) 구해질 수 있다. 그러나, 주요 계산 부하는 $\{ I - (L^{-1} J H^{-1}) K \}^{-1}$ 을 계산하는 것이

다. 여기서, $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 스펙트럼 반지름(spectral radius)이 1 보다 작다는 가정 아래 Neuman series expansion을 이용하여 식(12)에서 우변항의 첫 번째 항은 다음과 같이 전개될 수 있다.

$$\{I - (L^{-1}JH^{-1})K\}^{-1} = I + (L^{-1}JH^{-1})K + \{(L^{-1}JH^{-1})K\}^2 + \dots$$

첫 번째 차수까지 취하면

$$\{I - (L^{-1}JH^{-1})K\}^{-1} \cong I + (L^{-1}JH^{-1})K$$

위 근사치의 정확성은 행렬 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 norm이 작을수록 증가하게 된다. 식(7)과 (8)로부터 먼저 ΔX_2 를 유도해낸 이유는 $(H^{-1}KL^{-1})J$ 의 원소들이 실제의 전력 시스템에서 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 원소들보다 대체적으로 크기 때문이다.

따라서, 식 (12)는 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$\Delta X_2 = -\{I + (L^{-1}JH^{-1})K\}(L^{-1}JH^{-1}\Delta P - L^{-1}\Delta Q) \quad (14)$$

식(14)는 외견상으로 많은 계산을 요하는 듯이 보이나, H 와 L 의 LU 분해법(decomposition)을 한번 만들어주면, ΔX_2 는 연속적으로 벡터를 행렬의 뒤에서 곱해줌(postmultiply)에 의해 계산되어 질 수 있다. 식의 표현에서 비 대각 부 행렬 K 와 J 가 각각 ΔX_2 의 계산에 비교적 잘 반영되어 있음을 알 수 있다. 그리고, ΔX_1 은 식 (13)에서 보여진 바와 같이 ΔX_2 를 포함하기 때문에, 반복계산 당 최소한의 추가 계산 부담으로 이러한 반영의 이점을 가질 수 있다.

결과적으로, 식(14)와 (13)을 사용해서 전체 계산시간에서 NRL보다 적은 FLOP으로 상태 update 벡터를 안정적으로 계산할 수 있었다. 본 논문에서, 식(14)와 함께 식(13)을 the *Simplified Newton-Raphson Load Flow* (SNRL)라 명명하였다.

2.3. Enhanced Decoupled Load Flow(EDCL) 알고리즘

식 (14)로부터, 만약 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 norm이 충분히 작다면, $\{I + (L^{-1}JH^{-1})K\}$ 은 단위(identity) 행렬에 가깝게 되고, 식(14)는 다음과 같이 간략화 되어 질 수 있다.

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

식(15)로부터, 다시 $L^{-1}JH^{-1}\Delta P$ 를 무시하면

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

식(16)과 함께 식(13)은 반복계산 횟수와 수렴 속도 양쪽에서 DCL보다 우수한 수렴 성능을 보여주었다. 이들 식(13)과 (16)을 이용한 조류계산법을 the *Enhanced Decoupled Load Flow* (EDCL)라 명명하였다.

식 (13)에서 ΔX_2 의 사용으로 실질적으로 증가된 ΔX_1 이 정확도를 보기 위해 식(16)의 ΔX_2 를 치환하여 보면

$$\begin{aligned} \Delta X_1 &= H^{-1}(\Delta P - KL^{-1}\Delta Q) \\ &= H^{-1}\Delta P - H^{-1}KL^{-1}\Delta Q \end{aligned} \quad (17)$$

위 식에서 $-H^{-1}KL^{-1}\Delta Q$ 항은 기존의 DCL보다 정확도를 향상시키는 항으로 생각할 수 있다.

3. 수치적 모의 실험과 수렴 특성

제안된 알고리즘을 테스트하기 위해 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 알고리즘들은 New England 39-bus 시스템과 IEEE 118-bus 시스템을 사용하여 테스트하였다. R/X비율에 연관된 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 중요성을 시험하기 위하여, 평균 R/X 비율을 변화시켜가며 테스트하였다. $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 고유치(eigenvalue) 절대값의 최대값인 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 스펙트럼 반경(spectral radius)이 1보다 작을 때, 행렬 $\{I - (L^{-1}JH^{-1})K\}^{-1}$ 은 급수(power series)를 사용하여 전개할 수 있다. 따라서, $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 고유치 절대값의 최대값이 1에 근접할수록 수렴에 어려움을 겪게 될 것이 예상된다. 고유치의 최대값은 송전선의 R/X 비율이 증가함에 따라 함께 증가하였다. New England 39-bus 시스템에서의 테스트 결과를 표 1에 나타내었다. 제안된 두 알고리즘인 EDCL과 SNRL을 DCL과 NRL 알고리즘과 비교하였다. 또한 수렴에 요구되는 반복 횟수와 전체 부동 소수점 계산(floating-point operations)의 수를 표에 나타내었다. 참고로 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 고유치의 최대값도 함께 보였다.

H^{-1} 와 L^{-1} 를 포함하는 계산은 MATLAB에서 LU 분해법과 연속적으로 벡터를 뒤에서 곱해주는 방법(postmultiplication)으로 수행되었다.

테스트 결과 모든 경우에서 EDCL이 DCL보다 더 좋은 성능을 보였다. 성능면에서 DCL과의 차이는 R/X 비율이 증가할수록 더욱 현저해짐을 알 수 있었다. SNRL의 경우, NRL보다 약간 더 많은 반복횟수를 보였으나, 전체 flops 수는 작아지며, R/X 비율이 증가함에 따라 EDCL보다 나은 수렴특성을 보였다.

부하가 40% 증가되었을 때의 결과를 표 2에 나타내었다. 이 경우 DCL이 영향을 가장 많이 받는 것을 볼 수 있다. 그러나, R/X 비율이 증가함에 따라 모든 알고리즘들이 부하가 증가되지 않은 경우와 비슷한 결과를 나타내었다.

다음은 118-Bus 시스템에서의 실험 결과를 표 3에 나타내었다. 이 경우 EDCL이 가장 좋은 성능을 보여주었고, 다음으로 SNRL이 빠른 수렴특성을 나타내었다. 부하가 50% 증가했을 경우의 결과를 표 4에 나타내었다. 전반적으로 대부분의 알고리즘들에서 반복횟수가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 수렴 속도의 차이도 부하 증가전의 경우와 비슷하게 나타남을 알 수 있었다.

요약하면, EDCL은 테스트 시스템들의 경우, 항상 DCL보다 빠르고, R/X 비율이 아주 큰 경우를 제외하고는 SNRL이나 NRL의 경우보다도 대부분의 경우 빠른 수렴을 보여주고

표 1 New England 39-Bus 시스템에서 조류 계산 결과
Table 1 Load flow results for the New England 39-Bus system

R/X (AVG)	MAX EIGEN VALUE	Number of Iterations and Total FLOP Counts (×1000)			
		NRL	SNRL	EDCL	DCL
0.0238	-0.1037	3	4	5	10
		375.9	157.7	115.3	208.2
0.0331	-0.1296	3	4	6(P5)	10
		375.9	157.7	138.3	208.2
0.0596	-0.2998	3	5	10(P5)	16(Q15)
		375.9	197.2	184.5	322.6
*0.0679	-0.3810	3	6(P5)	12(P6)	20(Q19)
		375.9	216.9	207.5	405.9
0.0719	-0.4706	3	6(P5)	15(P7)	24(Q23)
		375.9	216.9	253.6	489.2
0.0737	-0.5081	3	5	17(P8)	26(Q25)
		375.9	197.2	288.2	530.8
0.0751	-0.5484	3	7(P4)	19(P9)	30(Q27)
		375.9	216.9	322.8	593.2

* : 기본경우(original case)

표 2 New England 39-Bus 시스템에서 조류 계산 결과
 (부하 40% 증가시)

Table 2 Load flow results for the New England 39-Bus system (load increase of 40%)

R/X (AVG)	MAX EIGEN VALUE	Number of Iterations and Total FLOP Counts (×1000)			
		NRL	SNRL	EDCL	DCL
0.0238	0.2253	4	5	8(P6)	15
		501.3	197.2	161.4	312.2
0.0331	0.1993	4	5	7(P6)	13
		501.3	197.2	149.9	270.6
0.0596	-0.2939	4	5	10(P6)	18(Q15)
		501.3	197.2	184.5	343.4
*0.0679	-0.3754	4	6(P5)	12(P6)	20(Q19)
		501.3	216.9	207.5	405.9
0.0719	-0.4651	4	7(P5)	15(P8)	26(Q23)
		501.3	236.6	265.2	510.0
0.0737	-0.5026	4	7(P5)	17(P8)	28(Q27)
		501.3	236.6	288.2	572.4
0.0751	-0.5430	4	5	19(P9)	32(Q29)
		501.3	197.2	322.8	634.9

* : 기본경우(original case)

있다. 실험 결과는 EDCL이 보통의 경우나 또는 특히 수렴에 문제성(problematic)이 있는 경우 DCL 또는 FDL의 대안으로서 사용될 수 있다는 가능성을 보여주고 있다. SNRL의 경우는 다른 근사 알고리즘들이 수렴에 문제가 발생할 경우 NRL 대신 사용될 수 있는 가능성을 보여주었다. 기대한 바와 같이, 모든 근사 알고리즘들은 R/X 비율 그리고 결과적으로 $(L^{-1}JH^{-1})K$ 의 고유치의 최대값에 민감하게 반응함을 보여주었다.

표 1에서 *로 표시된 39-Bus 시스템의 기본(original) 경우

표 3 IEEE 118-Bus 시스템에서 조류 계산 결과
 (전체 부하 : 4242 Mw)

Table 3 Load flow results for the IEEE 118-Bus system (total load size : 4242Mw)

R/X (AVG)	MAX EIGEN VALUE	Number of Iterations and Total FLOP Counts (×1000)			
		NRL	SNRL	EDCL	DCL
0.2285	-0.1924	3	3	5(P4)	10
		4261.5	900.7	821.4	1674.4
0.2299	-0.1831	3	3	5(P4)	10
		4261.5	900.7	821.4	1674.4
*0.2499	-0.2211	3	4	6(P5)	11
		4261.5	1200.9	1003.9	1841.8
0.2583	-0.2411	3	4	6(P5)	12
		4261.5	1200.9	1003.9	2009.2
0.2651	-0.3699	3	6(P4)	11(P5)	22
		4214.3	1492.8	1446.8	3646.5
0.2677	-0.4529	3	7(P4)	11(P5)	26
		4214.3	1642.0	1446.8	4309.6
0.2690	-0.5662	3	10(P5)	15(P5)	36
		4214.3	2239.1	1808.5	5967.1

* : 기본경우(original case)

표 4 IEEE 118-Bus 시스템에서 조류 계산 결과
 (부하 50% 증가시)

Table 4 Load flow results for the IEEE 118-Bus system (load increase of 50%)

R/X (AVG)	MAX EIGEN VALUE	Number of Iterations and Total FLOP Counts (×1000)			
		NRL	SNRL	EDCL	DCL
0.2285	-0.1935	3	3	6(P5)	11
		4261.5	900.7	1003.9	1841.8
0.2299	-0.1844	3	4	6(P5)	10
		4261.5	1200.9	1003.9	1674.4
*0.2499	-0.2223	3	4	6(P5)	12
		4261.5	1200.9	1003.9	2009.2
0.2583	-0.2423	3	4	7(P5)	12
		4261.5	1200.9	1095.2	2009.2
0.2651	-0.3698	3	6(P5)	11(P5)	22
		4214.3	1642.0	1446.8	3646.5
0.2677	-0.4502	3	8(P5)	12(P5)	26
		4214.3	1940.6	1537.2	4309.6
0.2690	-0.5637	3	10(P5)	16(P6)	36
		4214.3	2239.1	1989.3	5967.1

* : 기본경우(original case)

의 유효와 무효 전력의 mismatch에 대한 수렴 특성(profile)을 그림 1과 2에 나타내었다. ΔP 의 경우, EDCL의 수렴 특성이 가장 좋고, 다음으로 SNRL이 그 뒤를 따르고 있다.

DCL은 수렴과정에서 진동함을 보여주고 있고, NRL보다도 많은 시간이 걸리는 것을 알 수 있다. 그림 2의 ΔQ 의 경우에는 EDCL이 SNRL보다 약간 나은 경향을 보이고 있다. DCL은 ΔQ 의 경우에도 수렴과정에서 진동을 보여주고 있다.

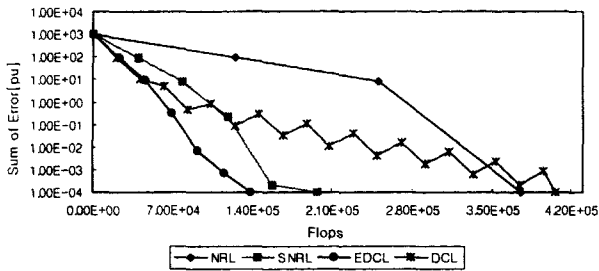


그림 1 New England 39-Bus 시스템에서 ΔP 의 수렴 특성
 Fig. 1 Convergence profiles for ΔP for the New England 39-Bus system

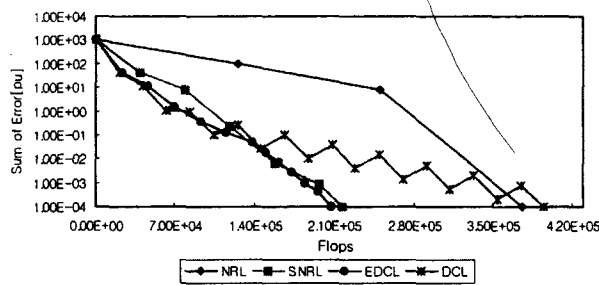


그림 2 New England 39-Bus 시스템에서 ΔQ 의 수렴 특성
 Fig. 2 Convergence profiles for ΔQ for the New England 39-Bus system

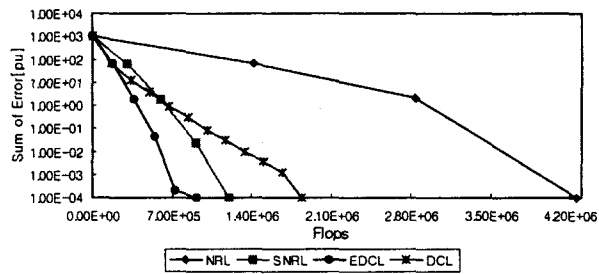


그림 3 IEEE 118-Bus 시스템에서 ΔP 의 수렴 특성
 Fig. 3 Convergence profiles for ΔP for the IEEE 118-Bus system

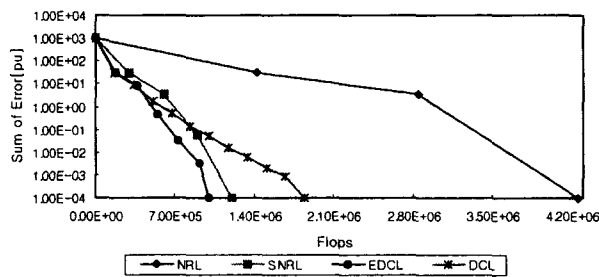


그림 4 IEEE 118-Bus 시스템에서 ΔQ 의 수렴 특성
 Fig. 4 Convergence profiles for ΔQ for the IEEE 118-Bus system

그림 3, 4는 IEEE 118-bus 시스템에서 유효와 무효 전력의 수렴 특성(profile)을 보여주고 있다. EDCL이 가장 나은 수렴 성능을 보여주고, SNRL, DCL, NRL이 그 뒤를 따르고 있다. 이 경우 DCL은 진동하지 않고, New England 39-bus 시스템과 비교하여 나은 성능을 보이고 있다. 두 경우의 결과를 보게 되면 시스템의 크기가 커질수록 알고리즘 간의 수렴 속도의 차가 더욱 현저하게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 EDCL과 SNRL이라 명명한 두 조류계산 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘들은 정상적인 상태뿐만 아니라 DCL 또는 FDL이 수렴이 잘 되지 않는 경우에도 그 대안으로 사용되어 질 수 있다. 테스트 시스템에서 EDCL은 여타 알고리즘과 비교해 가장 나은 수렴 특성을 보여주었다. 또한 SNRL의 경우는 반복계산 횟수는 NRL보다 약간 많으나 반복계산 당 부동 소수점 계산(FLOPs)수는 훨씬 적으므로, EDCL이나 DCL이 수렴에 어려움이 있을 때, NRL의 대안으로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다. 향후 FDL에 준하는 알고리즘의 간략화와 보다 대용량 계통에서의 시험을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 중앙대학교 학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] B. Stott, "Decoupled Newton load flows", IEEE Trans., PAS, Vol. PAS-91, pp. 1955-1957, September / October 1972.
- [2] B. Stott and O. Alsac, "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. Alsac, "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.

저 자 소 개



이 승 철 (李 承 哲)

1946년 6월 16일생. 1969년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1972년 재무부 전매청 신탄진 연초제조창 전력과장. 1977년 현대 엔지니어링 기전사업부 차장, 발송배전 기술사. 1982년 미국 Univ. of Florida 전기공학과 졸업(석사). 1985년

동 대학원 졸업(공학). 1985년 미 테네시대 우주항공 대학원 전기 및 컴퓨터 공학과 부교수. 1995년 중앙대 공대 전기공학과 부교수

Tel : 820-5325, Fax : 826-1103

E-mail : sclee@cau.ac.kr



박 상 수 (朴 祥 秀)

1972년 10월 24일생. 1998년 수원대학교 전기공학과 졸업. 1998년 중앙대 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 820-5325, Fax : 826-1103

E-mail : constant@ms.cau.ac.kr



박 경 배 (朴 京 培)

1973년 9월 19일생. 1999년 중앙대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 석사과정

Tel : 820-5325, Fax : 826-1103

E-mail : kbpark@ms.cau.ac.kr