

고속분할법의 수렴특성 개선에 관한 연구

이인용^{1,a}

¹ 한국폴리텍대학 스마트전기과

Research on the Improvement of Convergence Characteristics of the Fast Decoupled Load Flow

In-Yong Lee^{1,a}

¹ Department of Smart Electrical Engineering, Korea Polytechnic College, Seongnam 461-711, Korea

(Received March 15, 2012; Revised March 26, 2012; Accepted April 3, 2012)

Abstract: In this paper, we propose useful load flow algorithms called FEDL (fast enhanced decoupled load flow). The proposed load flow method can improve the convergence characteristics particularly when the P-Q coupling becomes significant and the power system operating states deviate from the conditions required for stable convergence of the FDL by reflecting in part the effects of the off-diagonal terms in the Jacobian. In our test with IEEE AEP-30 bus system and RTS-96 73-bus system, it converge even when the fast decoupled load flow (FDL) and its variations keeping load flow matrices constant experience convergence problems. Test results show promising performances of the proposed algorithms in their convergence characteristics both in number of iterations and overall convergence speeds.

Keywords: Fast enhanced decoupled load flow, Enhanced decoupled load flow, Convergence characteristics

1. 서론

전력시스템이 정상적인 전압크기와 위상각 그리고 적절한 부하가 걸려있을 때는 DCL (decoupled load flow) [1] 또는 Stott and Alsac에 의해 제안된 FDL (fast decoupled load flow) [2] 알고리즘이 그 빠르고 강력한 수렴특성으로 인해 효과적인 전력조류계산 도구로 사용되어져 왔다. 그러나 전력시스템에 심한 중부하 또는 경부하가 걸릴 때나 몇몇 송전선이 높은 R/X비를 가질 때, DCL 또는 FDL은 과도한 반복계산 (iteration)이 요구되거나 수렴이 어렵게 되는 경우가 발생할 수 있다. 이때는 계산시간은 비록 많이 걸리지만 안정된 수렴특성을 보이는 NRL (full newton-raphson load flow) [3]를 대신 사용하게 된

다.

전력시스템에 부하가 과중하게 걸리거나 혹은 큰 교란이 있을 때는 무효전력과 전압 위상각 그리고 유효전력과 전압크기와의 결합 (coupling)이 점차 증대되게 된다. 더욱이 전력시스템에 여러 개의 높은 R/X비를 가진 송전선이 존재할 경우, Nodal 어드미턴스 각이 커지게 되고, 그 결과로써 Jacobian행렬의 비대각 부행렬들의 요소값들이 증대되고 따라서 이들을 완전히 무시하게 되면 조류계산의 수렴성이 떨어지게 된다 [4]. 높은 R/X비율의 송전선들을 가지고 있는 시스템에서 FDL의 수렴성능을 향상시키기 위해 직렬 보상 (series and parallel compensation) [5], super-decoupling [6], 그리고 G 를 무시하지 않고 반영하여 R/X비가 높은 계통에서 우수한 수렴특성을 개선하였다 [7]. B' 을 사용하지 않아 수렴속도가 기

a. Corresponding author; leeiy@kopo.ac.kr

존 FDL 보다 50% 빠른 조류계산 모델을 개발 [8], 선로저항을 B' 에는 반영하고 B'' 에는 반영하지 않아 수렴시간을 줄이며 [9], R/X비가 높은 계통에서 $Q-V$ 계산에 $t\Delta P$ 를 반영하여 수렴성능을 개선하는 [10] 여러 기술들이 제안되었다. Jacobian 행렬의 비대각 부행렬의 일부를 매 반복계산 시 상태업데이트 벡터계산에 반영하여 매 반복계산 시 마다의 추가계산시간이 거의 필요 없으면서도 DCL보다 우수한 수렴특성을 나타내는 EDCL (enhanced decoupled load flow)가 제안되었다 [11]. 본 논문에서는 이러한 EDCL을 간략화하여 FDL처럼 Jacobian의 업데이트 없이 고속으로 조류계산을 수렴할 수 있는 FEDL (fast enhanced decoupled load flow) 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 EDCL에서 Jacobian의 부행렬들을 일정한 값을 가진 서셉턴스로 근사화하였고 비대각 부행렬의 일부를 반영함으로써 수렴특성을 향상시켰다. 제안된 알고리즘의 효용을 보이기 위해 IEEE 30-bus test system과 IEEE RTS-96 system [12]을 이용하여 시험하였다. 제안된 조류계산 알고리즘은 FDL과 비교할 때 반복계산 당 시간 증가는 무시할 수 있을 수준이면서도 전체적으로는 보다 빠르고 안정적인 수렴특성을 나타내었다. 특히 Jacobian의 비대각 부행렬들의 요소들의 값이 증대되는 계통사고들을 상정하여 수렴특성을 비교한 결과 계산 반복회수 및 수렴시간이 현저히 향상되었으며, FDL이 수렴하지 않는 경우에도 제안한 알고리즘은 수렴을 하는 경우도 나타나는 등 우수한 수렴특성을 나타내었다.

2. 실험 방법

2.1 제안 알고리즘

2.1.1 배경

전력시스템이 정상상태일 때 각 모선에서 송전선로로 유입되는 전력은 다음과 같은 비선형 결합 (coupled) 대수식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_i &= P_{gi} - P_{di} = \operatorname{Re} \left(V_i^* \sum_j Y_{ij} V_j \right) \\ &= |V_i| \sum_j |Y_{ij}| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \\ i, j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_{gi} - Q_{di} = -\operatorname{Im} \left(V_i^* \sum_j Y_{ij} V_j \right) \\ &= -|V_i| \sum_j |Y_{ij}| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \\ i, j &= 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

여기서

P_{gi}, Q_{gi} : 모선 i 에서 연결 송전선로로 유입되는 유효, 무효 전력

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

$|V_i| \angle \delta_i$: 모선 i 에서의 복소전압

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

식 (1)과 식 (2)로부터 모선 i 의 전력 mismatch는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

위 식으로부터 상태 변화에 따른 해점 (solution point)에서의 모선전력 mismatch 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} F_p \\ F_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_p}{\partial X_1} & \frac{\partial F_p}{\partial X_2} \\ \frac{\partial F_q}{\partial X_1} & \frac{\partial F_q}{\partial X_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} HK \\ JL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta X_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

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_g 까지는 J 와 K 를 square 행렬로 만들어주기 위해 포함시켰으며, 이때 K 와 L 에서 해당되는 열은 간단하게 1이 되므로 실질적으로 더 이상의 추가 계산이 필요하지 않다. 만일 발전기 i 가 Q 한계점에 도달하여 전압제어모선에서 부하모선으로 바뀌면 해당 Q_i 는 $|V_i|$ 로 바뀌고 Jacobian의 크기는 일정하게 유지된다. 또 다른 대안적인 표현은 ΔX_2 에서

$|\Delta V|/V$ 로 대치하고, K 와 L 을 상응하게 바꿔줌에 따라 얻어질 수 있다. 식 (5)로부터,

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

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

을 유도할 수 있다.

2.2 Enhanced decoupled load flow(EDCL)

Jacobian의 부행렬들로 나타낸 상태벡터의 업데이트를 이용한 우수한 계산법이 있다 [11]. Jacobian의 비대각 부행렬들을 완전히 무시한 DCL은 수렴에 어려운 경우가 있다. 따라서 DCL의 수렴특성을 향상시키기 위한 방법이 EDCL인데, EDCL은 반복계산회수와 수렴속도 양쪽에서 DCL, NRL보다 우수한 수렴성을 나타내고 있다. 다음은 EDCL의 알고리즘이다. 식 (7), (8) 양변에 H^{-1}, J^{-1} 를 각각 곱해주면 다음 과 같이 된다.

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

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

식 (9)에서 식 (10)을 빼면 다음과 같이 된다.

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

식 (11)을 ΔX_2 에 관하여 정리하면

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

식 (7)을 ΔX_1 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

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

식 (12)에서

$[I - (L^{-1}JH^{-1})K]^{-1} \cong I + (L^{-1}JH^{-1})K$ 로 근사화할 수 있어 다음과 같이 된다.

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

식 (14)에서 $[I + (L^{-1}JH^{-1})K] \cong I$ 로 근사하여 간략화하면 다음과 같다.

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

식 (15)에서 다시 $L^{-1}JH^{-1}\Delta P$ 를 무시하면 다음 식이 된다.

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

식 (13)과 함께 식 (16)은 반복계산 회수와 수렴속도 면에서 DCL, NRL 보다 우수한 수렴 성능을 보여주었다. 또한 FDL이 수렴하지 못할 경우에도 수렴함을 보여주었다. 이들 식 (13)과 식 (16)을 이용한 조류계산법을 EDCL (enhanced decoupled load flow)라 한다.

2.3 Fast enhanced decoupled load flow(FEDL) 알고리즘

식 (13)과 식 (16)에서 Jacobian의 부행렬들을 일정한 값을 가진 서셉턴스로 근사화하고 비대각 부행렬의 일부를 반영하여 수렴특성을 향상시키도록 하였다. Stott and Alsac의 고속분할법에 의하면 상태벡터 업데이트는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta X_1 = \frac{-[B']^{-1}}{|V|} \Delta P \quad (17)$$

$$\Delta X_2 = \frac{-[B'']^{-1}}{|V|} \Delta Q \quad (18)$$

여기서 B' 과 B'' 은 모션어드미턴스 행렬의 허수부이다.

따라서 식 (17), (18)을 식 (13), (16)에 대입하여 다음과 같이 Jacobian을 모션어드미턴스의 서셉턴스로 간략화할 수 있다.

$$\Delta X_2 = \frac{-[B']^{-1}}{|V|} \Delta Q \tag{19}$$

$$\Delta X_1 = \frac{-[B']^{-1}}{|V|} (\Delta P - K \Delta X_2) \tag{20}$$

위 식에서 $\frac{[B']^{-1}}{|V|} K \Delta X_2$ 항은 기존의 FDL보다 정확도를 향상시키는 항으로 생각할 수 있다. K 의 대각요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= 2|V_i||Y_{ii}|\cos\theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j||Y_{ij}|(\cos\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ &= 2|V_i||Y_{ii}|\cos\theta_{ii} + \sum_{j=1}^n |V_j||Y_{ij}|(\cos\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i||Y_{ii}|\cos\theta_{ii} \\ &= |V_i||Y_{ii}|\cos\theta_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|} \\ &= |V_i|G_{ii} + \frac{P_i}{|V_i|} \end{aligned} \tag{21}$$

K 의 비대각 요소는 다음과 같다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i||Y_{ij}|\cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \tag{22}$$

식 (22)에서 정상상태에서는 $\delta_j - \delta_i$ 는 매우 작으므로 $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ij}$ 로 간략화할 수 있어 다음과 같이 간략화된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} &= |V_i||Y_{ij}|\cos\theta_{ij} \quad j \neq i \\ &= |V_i|G_{ij} \end{aligned} \tag{23}$$

3. 결과 및 고찰

3.1 수치적 모의실험과 수렴특성

본 논문에서 제안한 알고리즘의 실효성을 시험하기 위하여 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 개발환경은 IBM 호환 PC (펜티엄 4)이고 MATLAB을 이용하여 개발하였다. 수렴판정은 $\Delta P, \Delta Q$ 모두 허용오차 10^{-3} 보다 작을 때를 수렴조건으로 하였다.

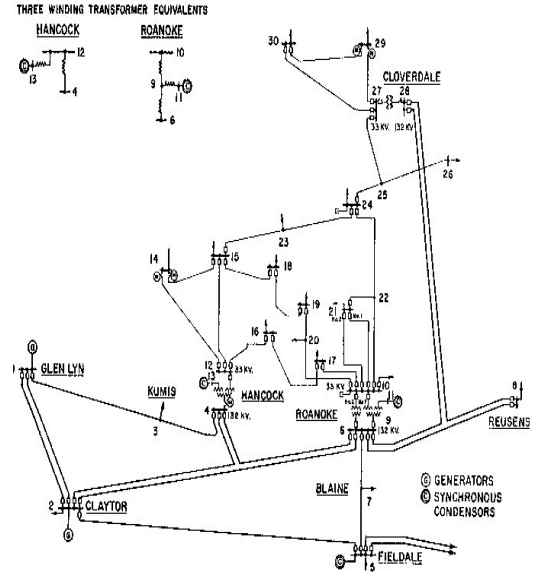


Fig. 1. IEEE 30-bus system.

Table 1. Load flow results for the IEEE 30-bus system (total load size: 283 MW, NC: not converge).

Contingency	Iteration & Convergence time ($\times 10^{-4}$ sec)	
	FDL	FEDL
0	15	9
	88	73
1	26	14
	120	91
2	25	10
	120	75
3	21	13
	107	92
1 & 2	26	12
	123	84
1 & 3	26	14
	128	93
2 & 3	24	13
	117	89
1 & 2 & 3	27	14
	130	92

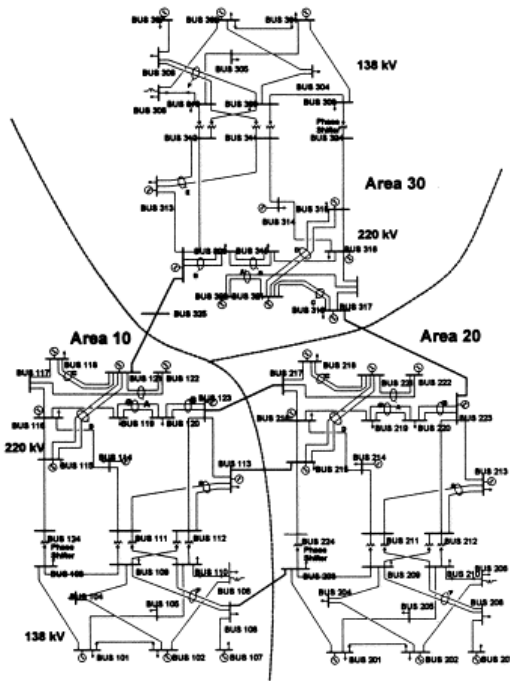


Fig. 2. IEEE RTS-96 system.

표 1은 IEEE 30모선 계통에서의 정상상태 및 선로 사고 시 조류계산 결과를 나타내었다. 상정사고에서 0은 정상상태를 나타내며 선로조류가 많이 흐르는 선로 3개를 선택하여 각각 모의 단선사고를 상정하였다. 1:모선1-2 (177 MW), 2:모선2-5 (82 MW), 3:모선4-12 (44 MW)의 단선사고 사례를 나타낸다. ΔP , ΔQ 중 하나라도 수렴제약조건을 만족하지 못하고 발산한다면 표 1에 NC (not converge)로 표시하였다. 시험결과 FDL에 비해 반복계산 당 시간은 증가하였지만, 반복계산 횟수는 감소하여 전체적인 수렴시간은 제안한 FEDL이 FDL에 비해서 약 25% 감소하였다. 수렴시간의 감소는 정상 상태에서는 약 7% 감소되었고, 사고 시에는 약 26% 감소되었다. 따라서 사고 시에 더욱 수렴 특성이 향상됨을 알 수 있다.

표 2는 IEEE RTS-96 73모선 계통에서의 조류계산 결과를 나타내었다. 상정사고에서 0:정상상태이고 1:모선16-14 (330 MW) 2:모선17-16 (313 MW) 3:모선64-62 (295 MW) 단선사고 사례이다. 정상상태에서 수렴특성 향상은 없지만, 단선사고 시에는 수렴특성의 우수성이 현저하다. 시험결과 반복계산 당 시간은 증가하였지만 반복계산 횟수가 현저히 감소하여 전체적인 수렴시간은 제안한 FEDL이 FDL보다 감소하였

Table 2. Load flow results for the IEEE RTS-96 (total load size: 8,550 MW, NC: not converge).

Contingency	Iteration & Convergence time($\times 10^{-4}$ sec)	
	FDL	FEDL
0	31	30
	435	528
1	NC	NC
2	NC	44
	NC	711
3	40	24
	533	433
1 & 2	NC	NC
1 & 3	NC	63
	NC	965
2 & 3	57	32
	705	550
1 & 2 & 3	NC	NC

다. 수렴시간의 감소는 사고 시에는 20% 정도 감소를 보여 수렴특성이 더 향상됨을 알 수 있었다. 특히 2번 상정사고와 1 & 3 상정사고의 경우 FDL은 수렴하지 않는데 불구하고 FEDL은 비교적 빠른 시간에 수렴함을 보여주었다. 이는 FDL에서 Jacobian의 비대각 부행렬들을 완전히 무시하게 되어 수렴성이 떨어진데 비해서, FEDL에서는 비대각 부행렬들을 반영함으로써 FDL 보다 정확도를 향상시키는데 기여한 것으로 생각할 수 있다. FDL이 수렴하지 않는 성격을 보면 어느 편차까지는 수렴을 하다가 더 이상 수렴하지 않고 어느 값에서 작은 폭의 진동을 하며 수렴하지 않는 반면에 FEDL은 1번 사고 시는 144회에 0.2065초에 수렴하였으며 1 & 2 & 3번 사고 시는 133회에 0.1905초로 수렴하였지만 NC라고 본 것이다. 1 & 2번 사고 시는 FDL과는 달리 진동하지 않고 수렴폭이 작으면서 계속 수렴이 되고 있는 것으로 보아 제안한 알고리즘이 우수한 특성을 나타내었다.

4. 결론

본 논문에서는 FEDL이라 명명한 조류계산 알고리

증을 제안하였다. 이는 Jacobian행렬의 비대각 부행렬들을 완전히 무시하는 FDL이 수렴에 어려움이 있는데 대해서 Jacobian의 비대각 부행렬들을 잘 반영함으로써 수렴특성을 향상시켰다. 더구나 FDL이 수렴하지 않는 경우에도 FEDL은 확실히 수렴하여 그 대안으로 사용되어질 수 있음을 보여주었다. 이는 비대각 부행렬들을 반영함으로써 정확도가 향상되어 수렴특성이 개선되었고 FDL의 대안으로 사용할 수 있는 가능성을 보여주었다.

REFERENCES

- [1] B. Stott, *IEEE Trans. on PAS*, **91**, 1955 (1972).
- [2] B. Stott and O. Alsac, *IEEE Trans. on PAS*, **93**, 859 (1974).
- [3] W. F. Tinney and C. E. Hart, *IEEE Trans. on PAS*, **86**, 1449 (1970).
- [4] F. F. Wu, *IEEE Trans. on PAS*, **96**, 268 (1977).
- [5] S. Deckmann, A. Pizzilante, A. Monticelly, B. Stott, and O. Alsac, *IEEE Trans. on PAS*, **99**, 2292 (1980).
- [6] P. H. Haley and M. Ayres, *IEEE Trans. on PAS*, **104**, 104 (1985).
- [7] D. Rajicic and A. Bose, *IEEE Trans. on PWRS*, **3**, 743 (1988).
- [8] K. Behnam-Guilani, *IEEE Trans. on PWRS*, **3**, 734 (1988).
- [9] R. A. M. Van Amerogen, *IEEE Trans. on PWRS*, **4**, 760 (1989).
- [10] L. Wang and Li XR., *IEEE Trans. on PWRS*, **15**, 208 (2000).
- [11] S. C. Lee, *Electrical Power and Energy Systems*, **25**, 319 (2003).
- [12] C. Grigg and P. Wong, *IEEE Trans. on PWRS*, **14**, 1010 (1999).