'95 대한전기학회 하계학술대회 논문집(1995. 7. 20~22)

슬랙모선의 영향을 고려한 손실 재분배 조류계산 알고리즘

박 시 우 °, 신 중 린, 임 한 석
건국대학교 공과대학 전기공학과

Loss Redistribution Load Flow Algorithm considering Slack Bus Effects

Si-Woo Park °, Joong-Rin Shin, Han-Suck Yim
Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Kon-kuk University

Abstract - In the conventional power flow calculations, the slack bus is assumed to undertake the total transmission loss for the convenience of numerical computation. This is an unrealistic assumption because, in real power system, the transmission loss is supplied by all the generators and makes the power flow calculation results somewhat distorted. This paper proposes a new loss redistribution algorithm that can reduce the distortion of power flow results. In the proposed method, the system power loss redistribution algorithm is added to the conventional power flow equations and jacobian elements that are related the real power are newly constructed. In each iteration step, the power output of each generator is updated to consider the effect of calculated total power losses. Finally the usefulness of proposed method are tested through the some appropriate case studies.

1. 서론

기존의 전력조류계산은 그 방법면에서 수치해석상의 문제 때문에 슬랙 모선을 설정하여 전압크기와 전압의 위상각을 지정하여 계산하였으며 이는 모든 계통손실을 슬랙모선이 담당한다고 가정하는 것임을 의미하는 것이다. 이러한 가정은 전력조류계산 결과를 왜곡시킬 수 있다. 왜냐하면, 슬랙 모선의 위치선정에 따라 모선의 전압값이 다르게 나타날 수 있으며 그에 따른 전압분포는 실제와 다른 분포를 가질 수 있기 때문이다. 특히 전압안정도 해석의 경우 조류계산을 하게 되는 계통운전점은 전압붕괴점에 가까운 경우가 대부분이므로 계통의 상대적인 손실량이 증가하게 되어 슬랙모선의 영향에 의한 전압의 왜곡은 더욱 심하게 나타나며 따라서 왜곡된 전압을 이용하여 얻은 여러가지 전압안정도지수(Voltage Stability Index) 또한 신뢰성을 가질 수 없을 것이기 때문에 전압붕괴의 정밀한 예측은 어려워질 것이다 [1].

본 논문에서는 앞에서 지적한 문제점을 극복하여 전압붕괴점 부근의 계통운전점과 같이 전력조류계산의 해를 구하기가 쉽지 않은 상황에서도 조류계산 해의 수렴성을 향상시킬 수 있도록, 기존의 전력조류계산식에 계통의 송전손실을 각 발전기에 적절히 분배시킬 수 있는 손실 재분배 알고리즘을 제안하였다.

2. 본론

2.1 기존 조류계산법에서의 발전모선

n 모선 계통에서 i번째 발전모선은 다음 [그림 1]처럼 표현되며 전력방정식은 식(1)과 같다.

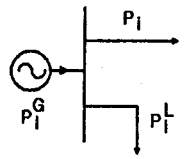

그림 1 기존방법에서의 발전모선

여기서, P_i^G : i 번째 모선 발전기의 발전 전력

P_i^L : i 번째 모선 부하

P_i : i 번째 모선의 순 주입 전력

$$P_i = P_i^G - P_i^L = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) \quad (1a)$$

$$Q_i = Q_i^G - Q_i^L = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}) \quad (1b)$$

2.2 제안된 방법에서의 발전모선

시스템의 송전손실을 각각의 발전기가 분담한다고 하면 송전손실을 분담하는 i번째 발전모선은 [그림 2]와 같이 표현 가능하다.

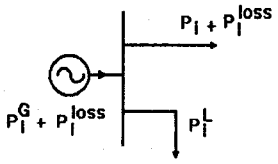

그림 2 손실을 포함하는 발전모선

여기서 P_i^{loss}를 i번째 발전기가 분담해야할 송전손실이라하면 i번째 발전모선에서의 전력방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_i + P_i^{loss} = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) \quad (2)$$

여기서 i번째 발전모선의 손실 분담량 P_i^{loss}를 V, δ의 함수로 모델링 할 수 있다면 슬랙을 제외한 발전모선 전력방정식의 새로운 형태를 구할 수 있다.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) - P_i^{loss} \quad (3a)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij}\sin\delta_{ij} - B_{ij}\cos\delta_{ij}) \quad (3b)$$

2.3 손실 분배 알고리즘

전체 송전손실을 어떻게 각 발전기에 적절히 분배하는가의 문제 또한 해의 왜곡을 방지하는 관건이 되므로, 시스템의 물리적 특성을 가장 적절하게 고려해야만 한다. 시스템의 송전손실은 각 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하므로, 각 발전기의 송전 손실 분담량은 다음과 같이 발전 전류량의 자승에 비례한다고 가정할 수 있다.

$$P_i^{loss} = \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in G} |I_i|^2} \times P^{loss} \tag{4}$$

여기서, 전체 송전손실 P^{loss}는 선로조류로부터 다음과 같이 표현되며,

$$P^{loss} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} V_i G_{ij} (-V_i + V_j \cos\delta_{ij}) \tag{5}$$

식(4)를 식(3)에 대입하여 발전모선에서의 새로운 전력방정식을 구할 수 있다.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij}) - \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in G} |I_i|^2} \times P^{loss} \tag{6}$$

(6)식의 전류에 관한 항은 시스템의 절점방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$|I_i|^2 = \left\{ \sum_{j=1}^{n} (G_{ij} V_j \cos\delta_i - B_{ij} V_j \sin\delta_j) \right\}^2 + \left\{ \sum_{j=1}^{n} (G_{ij} V_j \sin\delta_i + B_{ij} V_j \cos\delta_j) \right\}^2$$

$$\sum_{i \in G} |I_i|^2 = \sum_{i \in G} \left[\left\{ \sum_{j=1}^{n} (G_{ij} V_j \cos\delta_i - B_{ij} V_j \sin\delta_j) \right\}^2 + \left\{ \sum_{j=1}^{n} (G_{ij} V_j \sin\delta_i + B_{ij} V_j \cos\delta_j) \right\}^2 \right]$$

2.4 수정되는 Jacobian 성분

발전모선의 전력방정식이 새롭게 구해졌으므로 기존의 Jacobian의 구성 중 바뀌는 성분은 $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i}$, $\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}$, $\frac{\partial P_i}{\partial V_j}$ 이 되며 식(6)에 대해 편미분하여 다음과 구할 수 있다.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \frac{\partial K_i}{\partial \delta_i} - \frac{\left\{ \frac{\partial |I_i|^2}{\partial \delta_i} P_{loss} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta_i} \right\} \sum_{i \in G} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{loss} \frac{\partial \sum_{i \in G} |I_i|^2}{\partial \delta_i}}{\left\{ \sum_{i \in G} |I_i|^2 \right\}^2}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = \frac{\partial K_i}{\partial \delta_j} - \frac{\left\{ \frac{\partial |I_i|^2}{\partial \delta_j} P_{loss} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta_j} \right\} \sum_{i \in G} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{loss} \frac{\partial \sum_{i \in G} |I_i|^2}{\partial \delta_j}}{\left\{ \sum_{i \in G} |I_i|^2 \right\}^2}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} V_i = \frac{\partial K_i}{\partial V_i} V_i - \frac{\left\{ \frac{\partial |I_i|^2}{\partial V_i} P_{loss} + |I_i|^2 \frac{\partial P_{loss}}{\partial V_i} \right\} \sum_{i \in G} |I_i|^2 - |I_i|^2 P_{loss} \frac{\partial \sum_{i \in G} |I_i|^2}{\partial V_i}}{\left\{ \sum_{i \in G} |I_i|^2 \right\}^2}$$

여기서, $K_i = \sum_{j=1}^{n} V_i V_j (G_{ij} \cos\delta_{ij} + B_{ij} \sin\delta_{ij})$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial \delta_i} = -2 G_{ii} V_i (\sin\delta_i - \cos\delta_i) - 2 B_{ii} V_i (\sin\delta_i + \cos\delta_i)$$

$$\frac{\partial \sum_{i \in G} |I_i|^2}{\partial \delta_i} = -2 \sum_{i \in G} \{ G_{ii} V_i (\sin\delta_i - \cos\delta_i) + B_{ii} V_i (\sin\delta_i + \cos\delta_i) \}$$

$$\frac{\partial |I_i|^2}{\partial V_i} = 2 G_{ii} (\sin\delta_i + \cos\delta_i) - 2 B_{ii} (\sin\delta_i - \cos\delta_i)$$

$$\frac{\partial \sum_{i \in G} |I_i|^2}{\partial V_i} = 2 \sum_{i \in G} \{ G_{ii} (\sin\delta_i + \cos\delta_i) - B_{ii} (\sin\delta_i - \cos\delta_i) \}$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial \delta_i} = -2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} V_i V_j G_{ij} \sin\delta_{ij}$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial V_i} \times V_i = -2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} V_i^2 G_{ii} + 2 \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} V_i V_j G_{ij} \cos\delta_{ij}$$

2.5 손실 재분배 알고리즘을 이용한 전력조류계산

제안된 알고리즘을 이용한 전력조류계산은 유효 전력 방정식으로서 (3)식을 이용한다는 점과 Jacobian 행렬의 일부 요소값 계산이 달라진다는 점을 제외하면 기존의 전력조류계산 과정과 유사하다. 다음 식(7)과 같은 형태의 수정된 Jacobian을 이용한 수정 방정식으로부터 각 모선의 전압과 위상이 Newton-Raphson 계산 과정에 의해 개선된다. 식(7)의 Jacobian 요소 중, 고딕체 부분은 수정된 Jacobian 요소이다.

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta_{gen} \\ \Delta\delta_{load} \\ \Delta V / V_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathrm{H} & \mathrm{H} & \mathrm{N} \\ H & H & N \\ J & J & L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P_{gen} \\ \Delta P_{load} \\ \Delta Q_{load} \end{bmatrix} \tag{7}$$

계산이 수렴된 후, 손실을 포함하는 실제 발전모선의 발전량 P_i^{new}는 식(4)를 이용하여 다음 식(8)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} P_i^{new} &= P_i + P_i^{loss} \\ &= P_i + \frac{|I_i|^2}{\sum_{i \in G} |I_i|^2} \times P^{loss} \end{aligned} \tag{8}$$

[그림 3]은 이 과정의 전체순서도를 보인 것이다.

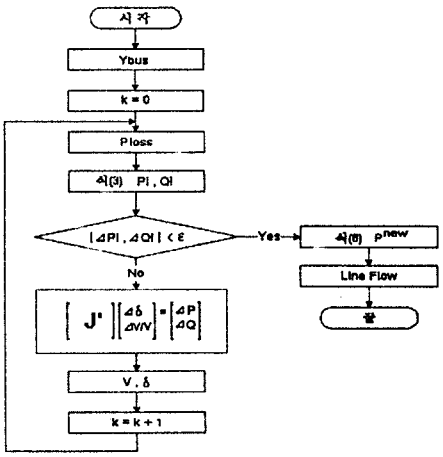

그림 3. 손실 재분배 조류계산의 순서도

3. 실험 및 검토

제안된 알고리즘을 IEEE 5모선, 14모선, 30모선에 적용한 결과는 다음과 같다.

3.1 계산 횟수

	5 모선 계통	14모선 계통	30모선 계통
기존 방법	3	3	3
제안 방법	4	5	5

표 1. 계산횟수 별 비교

제안된 방법의 Newton-Raphson 계산횟수는 기존방법보다는 증가되지만 수렴성이 많이 저하되지 않음을 알 수 있다.

3.2 모선 별 전압 및 발전량

① 5모선 시스템

No	기존방법			제안방법		
	전압	위상	발전량	전압	위상	발전량
1	1.0600	0	131.1222	1.060	0	129.8678
2	1.0000	-2.0612	40.0000	1.000	-2.0235	41.2249
3	0.9872	-4.6367	-	0.9873	-4.6090	-
4	0.9841	-4.9570	-	0.9841	-4.9273	-
5	0.9717	-5.7649	-	0.9717	-5.7293	-
손실			6.1222			6.0927

표 2. 5모선 시스템의 전압, 위상, 발전량, 송전손실 비교

② 14모선 시스템

No	기존방법			제안방법		
	전압	위상	발전량	전압	위상	발전량
1	1.0600	0	232.3859	1.0600	0	232.0663
2	1.0450	-4.9809	40.0000	1.0450	-4.9721	40.3029
3	1.0100	-12.7180	-	1.0100	-12.7101	-
4	1.0186	-10.3242	-	1.0186	-10.3172	-
5	1.0203	-8.7826	-	1.0203	-8.7762	-
6	1.0700	-14.2227	-	1.0700	-14.2161	-
7	1.0620	-13.3682	-	1.0620	-13.3614	-
8	1.0900	-13.3682	-	1.0900	-13.3614	-
9	1.0563	-14.9466	-	1.0563	-14.9398	-
10	1.0513	-15.1043	-	1.0513	-15.0975	-
11	1.0571	-14.7953	-	1.0571	-14.7886	-
12	1.0552	-15.0774	-	1.0552	-15.0708	-
13	1.0504	-15.1589	-	1.0504	-15.1523	-
14	1.0358	-16.0389	-	1.0358	-16.0322	-
손실			13.3859			13.3692

표 3. 14모선 시스템의 전압, 위상, 발전량, 송전손실 비교

③ 30모선 시스템

No	기존방법			제안방법		
	전압	위상	발전량	전압	위상	발전량
1	1.0500	0	138.0716	1.0500	0	135.6480
2	1.0338	-2.7233	57.5600	1.0338	-2.6637	57.9532
3	1.0330	-4.6884	-	1.0331	-4.6244	-
4	1.0284	-5.6161	-	1.0285	-5.5384	-
5	1.0058	-8.9604	24.5600	1.0058	-8.8050	25.8617
6	1.0230	-6.4782	-	1.0231	-6.3874	-
7	1.0083	-8.0109	-	1.0083	-7.8940	-
8	1.0230	-6.4585	35.0000	1.0230	-6.3667	35.0081
9	1.0442	-8.1381	-	1.0443	-8.0262	-
10	1.0399	-10.0294	-	1.0400	-9.9197	-
11	1.0913	-6.2627	17.9300	1.0913	-6.1273	18.1557
12	1.0462	-9.2527	-	1.0462	-9.1367	-
13	1.0883	-8.0613	16.9100	1.0883	-7.9222	17.2381
14	1.0317	-10.1566	-	1.0318	-10.0416	-
15	1.0277	-10.2559	-	1.0277	-10.1418	-
16	1.0363	-9.8631	-	1.0363	-9.7498	-
17	1.0335	-10.1913	-	1.0335	-10.0805	-
18	1.0198	-10.8823	-	1.0198	-10.7697	-
19	1.0182	-11.0594	-	1.0183	-10.9477	-
20	1.0229	-10.8605	-	1.0229	-10.7493	-
21	1.0269	-10.4767	-	1.0269	-10.3673	-
22	1.0272	-10.4620	-	1.0272	-10.3527	-
23	1.0177	-10.6456	-	1.0177	-10.5340	-
24	1.0128	-10.8136	-	1.0129	-10.7055	-
25	1.0195	-10.8182	-	1.0195	-10.7164	-
26	1.0019	-11.2360	-	1.0019	-11.1343	-
27	1.0323	-10.5504	-	1.0323	-10.4526	-
28	1.0180	-6.8806	-	1.0181	-6.7889	-
29	1.0126	-11.7585	-	1.0126	-11.6606	-
30	1.0013	-12.6251	-	1.0013	-12.5273	-
손실			7.1316			6.9648

표 4. 30모선 시스템의 전압, 위상, 발전량, 송전손실 비교

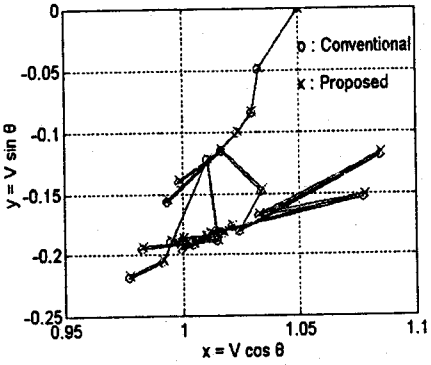

그림 4. 모선별 전압, 위상 비교

3.3 발전량 대 송전손실비

단위 : MW

	5모선 시스템		14모선 시스템		30모선 시스템	
	기존	제안	기존	제안	기존	제안
총 발전량	171.12	171.09	272.39	272.37	290.03	289.86
송전 손실	6.12	6.09	13.39	13.37	7.13	6.96
% 손실	3.58	3.56	4.91	4.90	2.46	2.40

표 5. 발전량 대 송전손실비

IEEE 5, 14, 30 모선 시스템의 경우, 기존 방법과 제안된 방법의 전압값은 거의 변화가 없었고, 위상이 조금 개선되었으며, 시스템 송전 손실의 경우, 발전량이 각 발전기에 분배됨으로써 감소됨을 알 수 있다. 그러므로, 송전손실이 상대적으로 크게되는 전압 붕괴점 근방에서의 기존 조류계산의 해의 왜곡을 이느 정도 완화시킬 수 있을 것이라 생각된다.

4. 결론

본 논문에서는 기존의 전력조류계산법에서 슬랙모선의 전체 송전 손실 부담을 감소시키기 위해 새로운 손실 재분배 알고리즘을 제안하였으며 제시된 손실 재분배 알고리즘을 기존의 전력조류계산에 추가함으로서 계통의 송전손실이 상대적으로 많아 기존의 조류계산으로는 수렴된 해를 얻기 어려운 경우에도 수렴된 해를 얻을 수 있는 가능성을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 전압붕괴점 부근에서의 조류해석이 요구되는 전압안정도검토 등 특히 송전손실이 상대적으로 크게되는 경우의 계통해석에 새로운 시각을 제시할 수 있으리라 본다

5. 참고문헌

[1] F. L. Alvardo , T. H. Jung, "Direct Detection of Voltage Collapse Conditions", EPRI EL-6183, Proceedings : Bulk power system voltage phenomena-Voltage stability and security , sec 5.2 , Jan, 1989

[2] M. A. Pai, "Computer Techniques in Power System Analysis", Tata McGraw-Hill, 1979

[3] W. F. Tinney , W. L. Powell, "Notes on Newton-Raphson Method form Solution of AC Power Problem", BPA Oregon, 1971

[4] O. I. Elgerd, "Electric Energy System Theory - An Introduction", 2nd ed. , McGraw-Hill, 1982

[5] G. W. Stagg, A. H. El-Abiad, " Computer Methods in Power Systems Analysis", McGraw-Hill, 1968