

배전계통 부하 균등화를 위한 재구성에 관한 연구

서규석* 백영식*
경북대학교*

A study of Reconfiguration for Load Balancing in Distribution Power System

Gyu-Seok Seo* Young-Sik Baek*
*Kyungpook National University

Abstract - 본 논문에서는 배전계통의 정상상태 운용 목적중 하나인 부하의 균등 배분에 관하여 연구하였다. 배전계통의 재구성이라 함은 위의 목적식에 따라 시스템 내에 존재하는 개폐기의 On/Off 상태를 변경하여 구성을 바꾸는 것이다. 이를 통하여 해당 전력계통의 부하가 평균화 되는 것을 보이도록 한다. 또한, 부하의 균등 배분이라는 목적으로 계통을 재구성한 결과와 손실의 최소화를 목적으로 재구성한 결과를 비교하여 보다 효율적인 방법을 제안하고, 그 해가 지역해에 빠지지 않고, 좀 더 빠른 시간에 최적해에 도달할 수 있는 방안을 구현하고자 한다.

1. 서 론

본 논문에서는 계통의 부하 균등화를 목적으로 재구성을 실시하였다. 하지만 부하 균등화에 대한 목적식을 이용하여 계통을 재구성 하는데 있어 그 해를 구하는 시간이 상당히 소요된다. 따라서 이런 단점을 보완하기 위해 손실 최소화를 위한 목적식을 제안하여 이에 대한 해가 부하 균등화와 밀접한 관계가 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 보이도록 한다. 이를 위해 계산 시간이 가장 빠른 분기 교환 알고리즘을 적용하였다. 그리고 계통의 초기 운전 상태에 따라 지역해를 구해내는 단점을 보완하기 위하여 초기 운전 상태를 변경하는 알고리즘을 제안하였다. 이는 현재의 계통 상태가 최적점 근방에서 운전되지 않는 경우 분기 교환 알고리즘은 지역해를 찾게 되는데, 이를 방지하기 위하여 최초의 계통 상태를 최적점 근방으로 이동시키는 방법이다.[1]

2. 본 론

2.1 부하 균등화를 위한 분기 교환 알고리즘

2.1.1 문제의 정식화

대상 계통의 부하를 평균화시키기 위한 목적식들은 매우 많이 존재한다. 지금까지 연구되어진 대부분의 목적식들이 가지는 의미를 살펴보면,

- i) 배전계통을 이루고 있는 각각의 선로들의 최대용량에 실제 흐르는 조류의 양을 선로 절체를 통하여 평균화함으로써, 부하 평형을 이룬다.
- ii) 각 선로들의 열용량에 대한 실제 흐르는 과부하 전류를 선로 절체를 통하여 최소화함으로써 전체 시스템에 대한 과부하를 해소하게 되고, 이로서 부하 평형을 이룬다.

등과 같다.[3][4]

결국 임의의 피더에 편중되어진 부하들을 선로 절체를 통하여 여유용량이 많은 피더들로 옮겨게 됨으로서 전체 시스템의 균형을 이루게 된다는 것이다.

이러한 관점에서 기존의 손실최소화를 목적으로 재구성을 실시한 계통의 시뮬레이션 결과를 살펴보면 손실이 줄어드는 것은 물론 부하평형의 목적식 또한 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 이에 대한 결과는 표 1에서 볼 수 있다.[1]

<표 1> 32모선 배전계통 시뮬레이션 결과

32 Bus System		
	Original State	Optimal State
Tie Switch	33-34-35-36-37	9-7-14-31-37
Loss (KW)	212.817	124.036
Load Balancing Index (10MVA)	0.035034	0.030280

표 1에서 Load Balancing index(모든 선로 최대 허용용량 : 10MVA) 값은 i)의 관점에서 계산된 값이다. 이런 결과로 부하 균등화를 위해 손실 최소화 목적식을 이용하여 접근해 볼 수 있다는 결론을 내리게 되었다. 손실의 최소화를 위한 목적함수는 식 1과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Min}(P_{\text{loss}}^{\text{sys}}) = \text{Min} \left(\sum r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \text{ [p.u]} \quad (1)$$

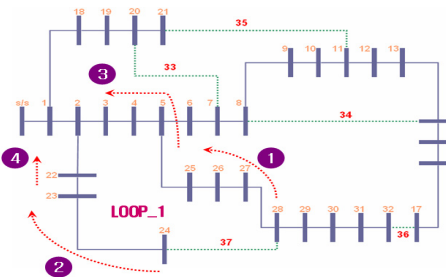
주어진 계통의 손실을 최소화하기 위해서 계통의 각 구성에 대해 목적함수를 계산하고 최소가 되는 구조를 채택하게 된다. 실제 계통운용은 경험상 최적점 근방에서 운전이 되고 있으므로 지역적 해의 탐색이 가장 우수한 분기 교환법을 사용하여 손실 최소화를 시키도록 한다.

2.1.2 절체시 손실감소 추정 및 분기 교환

배전계통의 구조는 루프형태를 이루고 있지만 실제 운용은 방사형으로 한다. 따라서 루프 구조에서는 하나의 브랜치가 반드시 개방되어야 하고 이를 결정하여야 한다. 본 논문에서는 선로가 절체됨에 따라 변화하는 선로손실이 최소가 되는 지점을 선택하도록 한다.[1]

2.1.3 절체시 손실감소 추정 및 분기 교환

배전계통 내에는 수많은 루프 구조가 존재한다. 루프 구조를 정확히 인식하여야만 방사상 운전 조건을 만족시킬 수 있지만 프로그램 상에 이를 반영하기란 쉽지 않다.



<그림 1> 배전계통 적용 모델(32 모선)

따라서, 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 순차적 방법을 제안한다.

예를 들어, 그림 1의 Loop_1에서

- i) Node 24의 전압이 Node 28의 전압보다 크다면 Node 28로부터 Node 27의 방향으로 Node 24의 전압보다 작아지는 값을 가지는 최초의 Node를 탐색.
- ii) Node 24로부터 Node 23의 방향으로 i에서 탐색된 Node 전압보다 작아지는 값을 갖게 되는 최초의 Node를 탐색.
- iii) i)과 ii)를 반복하여 Node name과 Node voltage 값이 일치하는 지점(Node 2)을 탐색하고 중지.

배전계통에서는 루프 구조를 해소하기 위하여 평시 개방되어 있는 연계 선로가 존재하는데, 이 선로의 개수와 루프의 개수는 동일하다. 따라서 프로그램이 인식하고 있는 각각의 연계선로에서 i, ii, iii을 수행함으로써 배전 계통 내 모든 루프를 인식 가능하게 된다.

2.2 초기 운전점 선정 알고리즘

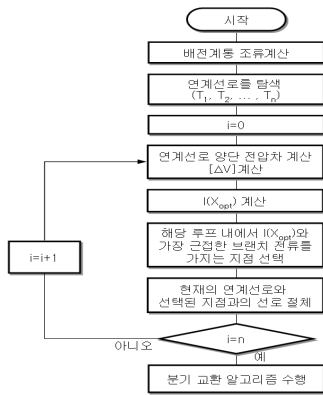
앞서 설명된 방법에 의하여 시뮬레이션 해본 결과 대상 계통의 초기 상태가 최적점 근처에서 운전이 되고 있을 경우에는 최적해를 찾아내지만, 최적점에서 많이 벗어난 상태로 운전될 경우에는 최적해를 찾아내지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 절에서는 이를 해결하기 위하여 초기 운전점을 최적점 근처로 옮길 수 있는 방법에 대하여 설명한다.

배전계통은 그 규모가 상당히 크며, 그 내부에 포함되어 있는 루프는 굉장히 많다. 이러한 상황 하에서 루프 상호 영향력을 고려하여 운전점을 결정하기란 쉽지 않다. 따라서 각 루프별 독립적으로 손실 최소화점을

구하기 위해 식 2를 정의한다.[1][2]

$$\Delta P = Re \left\{ 2 \left(\sum_{i \in D} I_i \right) (E_m - E_n)^* \right\} + R_{loop} \left| \sum_{i \in D} I_i \right|^2 \quad (2)$$

여기서 식 2는 계통의 임의의 운전 상태가 전역해 근방에 위치할 수 있도록 각 루프별 연계 개폐기 상태를 결정하기 위한 식이 된다.



<그림 2> 초기 운전점 선정을 위한 알고리즘

그림 2에서 제안한 알고리즘을 분기 교환법에 적용하여 시뮬레이션 해 본 결과 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.[1]

2.3 Loss Reduction 과 Load Balancing

Load Balancing이란 중부하의 부하를 경부하의 피더로 이동시켜 계통을 재구성함으로써 피더의 부하균형을 이루고, 과부하를 해소시키는데 그 목적이 있다. 결국 편중된 부하를 각 피더로 분산시킴으로서 전체 계통의 안정화를 도모하는데 이는 손실을 최소화하는 문제와 직결되어 있다. 따라서 본 절에서는 기존의 논문에서 Load Balancing에 대한 목적식을 이용하여 계통을 재구성한 결과와 제안한 알고리즘을 적용하여 재구성한 결과를 비교하도록 한다.

[3],[4] Objective Fn

$$[3] : \min LB_{sys} = \min \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_i}{S_i^{max}} \quad (3)$$

n_b : total number of branches in the system

$$[4] : \min LB_{sys} = \min \sum_{i=1}^{N_b} \frac{S_i}{S_i^{max}} = \min \sum_{i=1}^{N_b} \frac{\sqrt{P_i^2 + Q_i^2}}{S_i^{max}} \quad (4)$$

N_b : Total number branches in the system

S_i : $P_i + jQ_i$ = Magnitude of the complex power flow in line i

S_i^{max} : The KVA capacity of the system

표 2에서는 Load Balancing 목적식으로 제시한 식 3과 4를 적용하여 얻은 결과를 보여주고 있다. 여기서는 식 3 혹은 식 4를 적용해도 결국 같은 결과를 가진다는 것을 보이고 있다. 한편 본 논문에서 제시한 알고리즘에 대한 결과도 확인 가능하다.

<표 2> 69모선 배전계통 모델에서의 결과 비교

Reference [14], [15] - 69 Bus Model		
State	Original configuration	
Tie Switches	70, 71, 72, 73, 74	
Loss (kW)	223.946	
After Reconfiguration		
State	Load Balancing	Proposed Method
Tie Switches	15, 59, 62, 70, 71	15, 59, 64, 70, 71
Loss (kW)	99.4513	91.58

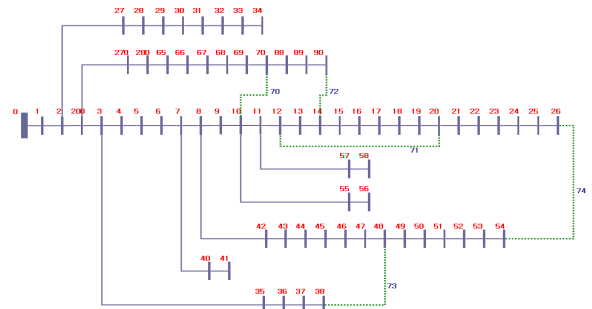
두 결과는 조금의 차이를 보이고 있으며 Load Balancing을 목적식으로 한 결과와 거의 흡사함을 볼 수 있다. 반면, 손실 측면에서는 제안한 알고리즘의 결과가 좀 더 우수하다는 것을 알 수 있다.

<표 3> Load Balancing Index value의 결과

Reference [14]	
System index value	0.02781

All Branch Capacity : 10MVA	
Reference[14]'s index value	Proposed Method's index value
0.078523	0.075952
All Branch Capacity : 28MVA	
Reference[14]'s index value	Proposed Method's index value
0.028044	0.027126

또한 표 3에서는 기존 논문에서 제안한 지표를 논문에서 제안한 손실 최소화 과정을 통해 얻어진 결과에 적용해 봄으로서 그 결과값을 비교해 보았다. 기존 논문에서 식 (3)을 적용하여 제시하고 있는 결과값은 0.02781이다.[4]



<그림 3> 배전계통 적용 모델(69 모선)

하지만 시스템 내의 선로 용량 데이터를 취득할 수 없어 본 논문에서는 모든 선로의 허용 용량을 국내 실정에 맞도록 10MVA로 설정한 후 시뮬레이션 해보았다. 또한 기존 논문과의 결과값에 근접시키기 위하여 허용용량을 28MVA로 늘려 시뮬레이션 하였다. 그 결과를 표 3에서 볼 수 있다. 이로서 본 논문에서 제안한 손실최소화를 위한 재구성 알고리즘을 통해 손실 감소와 부하균등화가 매우 잘 이루어짐을 알 수 있다.

표 2, 표 3의 시뮬레이션 결과는 그림 3의 69모선 배전계통 모델에 적용하여 얻어졌다.[5]

3. 결 론

본 논문에서는 배전계통 운용 알고리즘 중 최적 재구성에 관한 문제를 다루었다. 분기 교환법은 최적화 단계에서 지역 최적해를 도출한다는 단점을 가지고 있다. 이것을 보완하기 위해 초기 운전점 알고리즘을 제안하였으며, 그것을 도입한 결과 매우 빠른 시간에 전역 최적해를 찾을 수 있었다. 또한 부하균등화를 목적식으로 둔 논문들과의 결과를 비교해 보면, 손실 최소화를 위한 목적식을 이용하여 재구성을 하는 것이 계통의 손실이 좀 더 감소하고 동시에 부하균등화가 잘 이루어짐을 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 알고리즘이 배전계통 최적화에 매우 적합함을 확인할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Gyu-Seok. Seo, Jung-Nyun Kim, Young-Sik Baek, "A Study of Optimal Reconfiguration in Distribution Power System using Initial Operating Point", Trans. KIEE. Vol. 56, No. 3, pp. 451-456, Mar, 2007.
- [2] S. Civanlar, J. J., Grainger, and S. H. Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, July 1988, pp. 1217-1223.
- [3] Kashem, M.A., Ganapathy, V., Jasmon, G.B., "Network reconfiguration for load balancing in distribution networks", Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, Vol. 146, Issue 6, pp. 563-567, Nov. 1999.
- [4] Kashem, M.A., Moghavvemi, M., "Maximizing radial voltage stability and load balancing via loss minimization in distribution networks", Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD '98. 1998 International Conference on, Vol. 1, pp. 91-96, March 1998.
- [5] M. E. Baran, F. F. Wu, "Optimal capacitor placement on radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 725-734, January 1989.