

손실 최소화를 위한 배전계통 최적 재구성에 관한 연구

서규석* 백영식* 김정년**
 경북대학교* LG전선(주)**

A study of optimal reconfiguration for loss minimization in distribution power system

Gyu-Seok Seo* Young-Sik Baek* Jung-Nyun Kim**
 *Kyungpook National University **LG Cable Ltd

Abstract - 본 논문에서는 브랜치 교환(Branch Exchange) 방법을 이용하여 배전 계통을 재구성하는 문제에 대하여 연구하였다. 최적 재구성 문제는 선로 절체에 따라 달라지는 모든 가능한 계통 구성들에 대해 선로손실, 전압조건을 계산하고 이들 중 최적인 구성을 찾아내는 것이다. 하지만 빠른시간 내에 이에 대한 해를 찾기란 대단히 어렵다. 그 이유는, 계통내에 수많은 연계개폐기와 구분개폐기들이 존재하고 이들로써 방사상의 운전조건을 만족해야 하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 시간적으로 가장 유리한 특성을 갖는 브랜치 교환법을 이용하여 시스템 전체 손실이 감소하고 방사상 운전조건과 전압의 제약조건을 만족하도록 최적화하는 방안을 구현하고자 한다.

1. 서 론

배전계통의 정상상태의 운용은 손실의 최소화, 변압기 부하균등 배분이라는 목적하에 배전계통을 운전하는 것으로 최적 재구성 문제는 현재 배전계통의 구성 및 부하상태를 고려하여 개폐상태를 결정하는 최적화 문제이다. 이 문제는 배전계통의 방사상 운전조건, 전압강하와 선로의 열용량 등을 포함한 여러 가지 제약조건이 수반하는 것으로 선로 절체에 따라 달라지는 모든 가능한 계통구성들에 대해 선로손실, 전압조건을 계산하고 이들 중 최적인 구성을 찾아내는 것이다. 따라서, 해를 찾기 위한 가장 정확한 방법은 모든 경우에 대해서 계산을 근거로 찾아내는 방법일 것이다. 그러나 주어진 시간 내에 모든 조합의 경우를 계산한다는 것은 경제적인 면에서 비합리적이다.

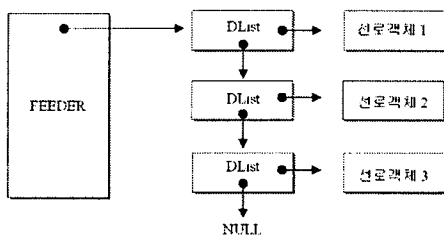
최적 재구성에 관한 연구는 초기에는 분지 한계법(Branch and Bound), 분기 교환법(Branch Exchange) 등으로 문제를 풀었다. 그러나 이들 방법은 계산 속도는 상당히 빠르지만 연계 개폐기의 초기 상태에 따라 지역해를 도출한다는 단점을 가지고 있다. 한편, 시뮬레이티드 어닐링 알고리즘, 유전자 알고리즘은 전역적인 해를 제공할 수 있는 가능성은 전술한 방법에 비해서 높지만 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다.

실제 계통운용은 경험상 최적점 근방에서 운전이 되고 있으므로, 본 논문에서는 계통 재구성 방안으로 지역적인 해의 탐색이 우수하고 시간적인 측면에서도 가장 우수한 분기교환 알고리즘을 개선시켜 빠른 시간내에 전역적인 해를 도출할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 배전계통의 표현

배전계통은 방사상 구조로 운용하지만 실제계통은 루프구조로 형성되어 있다. 이들 구조가 선로 절체에 따라서 변화하므로 이를 나타내고 표현하는데 많은 어려움이 따르며 프로그램으로 나타내기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 객체지향기법을 사용하여 선로 연결성을 나타내고 선로 구조의 변경에 쉽게 대응할 수 있는 방법을 제시한다.

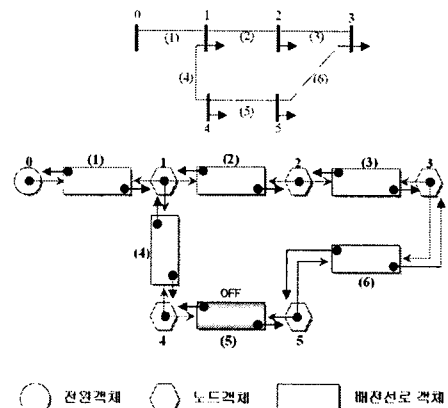


<그림 1> 피더의 표현

그림 1은 피더(Feeder) 객체를 도식화한 것으로 피더는 기본적으로 계산에 필요한 데이터와 함께 시스템의 토폴라지(topology)를 결정

하기 위해 다른 객체(선로)들의 연결 포인트를 가지고 있다 이것을 통하여 각 객체들 사이에 메시지 전달이 이루어진다. 그 외에 노드(Node), 배전선로객체(DLine), 부하(Load), 변압기(Transformer)등을 구성하며 전체 프로그램은 각각의 객체들의 연결 상태와 멤버함수를 사용한 객체 상호간의 메시지 전달로서 구성한다.

그림 2에서는 앞서 정의한 객체를 이용하여 실 배전계통과 일대일 대응이 되도록 시스템이 구현됨을 보여준다.



<그림 2> 배전계통의 객체도

2.2 문제의 정식화

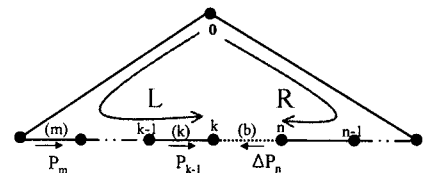
손실을 최소화를 위한 목적함수는 식 1과 같이 정의할 수 있다.

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

실제 계통운용은 경험상 최적점 근방에서 운전이 되고 있으므로 분기교환법으로 문제를 해결해도 무방하리라 사료된다.

2.3 절체시 손실감소 추정

그림 3과 같은 방사상으로 운전되는 운전되는 배전계통이 있다.



<그림 3> 브랜치 교환

여기서 연계 개폐기 b를 닫으면 루프형 계통을 형성하는데 배전계통의 방사상 운전조건이 위배되므로 위의 그림 3에서 L측 또는 R측 선로 중 어느 한 개폐기를 열어야만 한다. 이 때 선로의 절체에 따라 변화하는 선로 손실을 추정하고, 손실이 최소가 되는 연계선로에 대해서 절체를 수행하는 방식을 분기 교환법이라 한다.

식 (2)-(3)는 그림 3의 계통에서 L측과 R측에서의 계통의 손실은 다음과 같다.

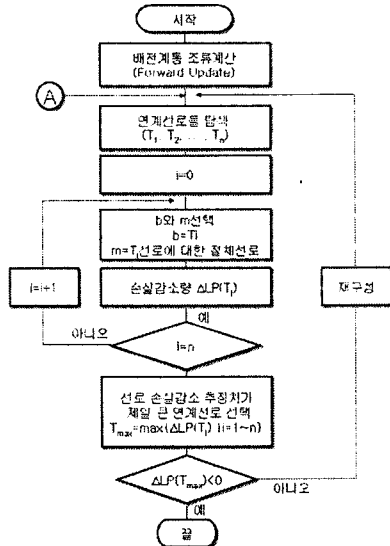
$$LP_L = \sum_{i \in L} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (2)$$

$$LP_R = \sum_{i \in R} r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (3)$$

선로 b를 OFF시키고 m을 ON시켰을 경우 손실의 변화는 식 4와 같다.

$$\Delta LP_{bm}^{est} = 2P_m \left(\sum_{i \in L} r_i P_i - \sum_{i \in R} r_i P_i \right) + 2Q_m \left(\sum_{i \in L} r_i Q_i - \sum_{i \in R} r_i Q_i \right) - (P_m^2 + Q_m^2) \left[\sum_{i \in R \cup L} r_i \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 $\Delta P_{bm}^{est} > 0$ 인 경우는 절체를 했을 경우 손실이 들어드는 것을 의미한다. 각 연계선로마다 ΔP_{bm}^{est} 을 계산한 후 더 이상 손실이 감소하지 않을 때까지 선로를 절체하면 된다. 분기교환법에 의한 최적화는 그림4와 같은 순서로 수행한다.



〈그림 4〉 최적재구성 알고리즘

2.4 모의 결과 및 검증

그림 4에서 제시한 방법에 의하여 아래 표 1에서 제시한 계통에 적용하여 시뮬레이션 하였다.

〈표 1〉 시뮬레이션을 위한 33모선(IEEE test system) 계통 데이터

Line No.	From Bus	To Bus	R(Ω)	X(Ω)	Load at To Bus	
					P(kW)	Q(kVar)
1	1	2	0.0922	0.0477	100.0	60.0
2	2	3	0.4930	0.2511	90.0	40.0
3	3	4	0.3660	0.1864	120.0	80.0
4	4	5	0.3811	0.1941	60.0	30.0
5	5	6	0.8190	0.7070	60.0	20.0
6	6	7	0.1872	0.6188	200.0	100.0
7	7	8	1.7114	1.2351	200.0	100.0
8	8	9	1.0300	0.7400	60.0	20.0
9	9	10	1.0400	0.7400	60.0	20.0
10	10	11	0.1966	0.0650	45.0	30.0
11	11	12	0.3744	0.1238	60.0	35.0
12	12	13	1.4680	1.1550	60.0	35.0
13	13	14	0.5416	0.7129	120.0	80.0
14	14	15	0.5910	0.5260	60.0	10.0
15	15	16	0.7463	0.5450	60.0	20.0
16	16	17	1.2890	1.7210	60.0	20.0
17	17	18	0.7320	0.5740	90.0	40.0
18	2	19	0.1640	0.1565	90.0	40.0
19	19	20	1.5042	1.3554	90.0	40.0
20	20	21	0.4095	0.4784	90.0	40.0
21	21	22	0.7089	0.9373	90.0	40.0
22	3	23	0.4512	0.3083	90.0	50.0
23	23	24	0.8980	0.7091	420.0	200.0
24	24	25	0.8960	0.7011	420.0	200.0
25	6	26	0.2030	0.1034	60.0	25.0
26	26	27	0.2842	0.1447	60.0	25.0
27	27	28	1.0590	0.9337	60.0	20.0
28	28	29	0.8042	0.7006	120.0	70.0
29	29	30	0.5075	0.2585	200.0	600.0
30	30	31	0.9744	0.9630	150.0	70.0
31	31	32	0.3105	0.3619	210.0	100.0
32	32	33	0.3410	0.5302	60.0	40.0
33*	21	8	0.0000	2.0000		
34*	9	15	0.0000	2.0000		
35*	12	22	0.0000	2.0000		
36*	18	33	0.0000	0.5000		

37*	25	29	0.0000	0.5000		
-----	----	----	--------	--------	--	--

* Tie Lines, Substation Voltage = 12.66kV

이에 대한 결과를 표 2에 제시하였으며, 기존에 제시된 EP Algorithm의 결과값과 비교 분석하였다.

〈표 2〉 시뮬레이션을 위한 33모선 계통 데이터

Method	EP Algorithm		Proposed Method	
	Base Case	Optimal state	Base Case	Optimal state
Lines switched out	33-34-35 -36-37	06-14-09 -32-37	33-34-35 -36-37	9-7-14 -31-37
Total kW Loss	211.22	128.26	212.817	124.036
Worst voltage(p.u)	0.9038	0.9378	0.899638	0.939657

3. 결 론

본 논문에서는 배전계통 운용 알고리즘 중 최적 재구성에 이르는 문제를 다루었다. 구성된 배전계통 해석 시스템의 유용성을 입증하기 위하여 모의계통에 적용하여 알고리즘의 우수성을 입증하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

실 계통운용이 경험상 최적점 근방에서 운전이 된다는 가정 아래 도입한 분기교환법의 적용으로서 기존의 시뮬레이터드 어닐링 알고리즘, 유전자 알고리즘, EP 알고리즘 등의 기법보다 빠른 시간에 비슷한 결과를 얻을 수 있었으며, 차후에는 현재 계통이 최적점 근방에서 운전하고 있지 않을 때를 대비하여, 전역 최적점을 찾는 알고리즘을 추가함으로써 분기교환법이 지역해로 빠지는 것을 방지하도록 하는 방향으로 연구되어질 것이다.

〈참고 문헌〉

- [1] 김정년, 백영식, "손실감소와 부하균등을 고려한 최적재구성" 하계학술대회, 1998.
- [2] Do-il Kwak, Jae-Eon Kim, "A Study for Novel DistFlow Method in the Distribution System", Trans. KIEE, Vol. 49A, No. 7, July 2000, pp. 365-368.
- [3] A Merlyn and J. Back, "Search for a Minimum Loss Optertaign Spanning Tree Configuration for and Urban Power Distribution System", Proceeding of Fifth Power System" Proceeding of Fifth Power System Computation Conference(PCSC), Cambridge, 1975.
- [4] D. W. Ross, M. Carson, A. Cohen, "Development of Advanced Meyhods for Planning Electric Energy Distribution Systems", DEO final report no SC15263, Feb, 1980.
- [5] D, Shirmohammadi, H. Wayne Hong, "A Compensation-Based Power Flow Method For Weakly Meshed Distribution And Transmission Networks", IEEE Tansaction on Power Systems, Vol 3, No. 2, May 1988, pp. 753-762.
- [6] 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.
- [7] M. E. Baran, F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989, pp. 1401-1407.
- [8] H. D. Chiang and R. M. Jean-Jumeau, "Optimal Network Reconfiguration Distribution System: Part 1: A New Formulation and A Solution methodology", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5. No. 3, July 1990.
- [9] K. Kara, "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 3, August 1992.
- [10] Vesna Borozan et al, "Improved Method For Loss Minimization In Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [11] Young-Jae Heon, Seung-Kyo Choi, Jae-Chul Kim, "Implementation of Simulated Annealing for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", 48A-4-4.
- [12] B. Venkatesh, H. B. Gooi, "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability", IEEE Transactions on Power System, Vol. 19, No. 1, FEBRUARY 2004.