

배전계통 최적 재구성 알고리즘의 실제 적용

서규석^{*} · 백영식^{*} · 김정년^{**} · 채우규^{***}
^{*}경북대학교 · ^{**}LS전선 · ^{***}전력연구원

Application Optimal Reconfiguration Algorithm for Distribution Power System to KEPCO System

Gyu-Seok Seo^{*} · Young-Sik Baek^{*} · Jung-Nyun Kim^{**} · Woo-Gyu Chae^{***}
^{*}Kyungpook National University · ^{**}LS Cable · ^{***}KEPRI

Abstract - This paper shows application of optimal reconfiguration algorithm for distributing power system to KEPCO(Korea Electric Power Corporation) system for loss minimization and load balancing. That is, it suggests additional algorithm to check potential problems caused in case of theoretical algorithm being applied to real system and recover from them. Also, comparing the results of reconfiguration algorithm Tabu-Search Algorithm applied to current KEPCO distribution power system and those of Branch Exchange Algorithm using initial operation point suggested in this paper, it shows how much the results are improved in aspects of load balancing, loss reduction and calculating time.

주어진 계통의 손실을 최소화하기 위해서 계통의 각 구성에 대해 목적함수를 계산하고 최소가 되는 구조를 채택하게 된다[1][2].

2.2 부하 균등화를 위한 목적함수

국내 배전계통에서는 부하 균등화를 위하여 식 (2)에서 제시하는 목적식에 따라 최적해를 탐색한다. 이 식은 현재 계통의 각 피더별로 할당되어진 부하량에서 피더별 평균 부하량의 차이를 계산하여, 그 편차를 최소화 시키겠다는 의미를 가진다. 즉 편차를 최소화함으로써 피더별 부하의 균등화를 이루겠다는 목적을 가진다[3].

$$\min \left(\sum_{i=1}^n (L_i - a)^2 \right) \quad (2)$$

- L_i : 피더에 할당된 부하량
- a : 피더에 할당된 부하량의 평균
- p : 시스템에 포함된 피더의 개수

1. 서 론

배전계통의 정상상태 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 계통 구성들에 대해 선로손실, 전압조건을 계산하고 이들 중 최적인 구성을 찾아내는 것이다.

현재 한전에서 전력계통 운용 시 최적상태를 유지하기 위하여 적용하는 판단 기준은 부하 균등화 지수이다. 이는 평시 각 변전소의 피더에 할당되는 부하량을 최대한 평준화시킨다는 의미를 가지고 있다. 이로써 비상시 부하절체 및 고장 복구의 효율성을 상승시킬 수 있고, 이에 상응하는 운용 전략을 수립할 수 있게 된다.

최근 한국 전력계통의 전력공급에 대한 신뢰도는 매우 높다. 이러한 현실 상황에서 전력 공급의 높은 신뢰도를 유지하기 위하여 부하 균등화에 대한 최적 상태만을 고려한다는 것은 다소 개선의 여지가 있어 보인다.

본 논문에서는 현재 한전에서 적용 중인 타부 서치를 이용한 부하 균등화 알고리즘 대신 분기 교환법을 이용한 손실 최소화 알고리즘을 적용하여 기본적으로는 손실을 줄이고, 더불어 부하의 균등화를 이룰 수 있는 방법에 대하여 제안한다[2].

2. 본 론

2.1 손실 최소화를 위한 목적함수

손실의 최소화를 위한 목적함수는 식 (1)과 같이 정의할 수 있다.

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

식 (2)의 최적해를 탐색하기 위하여 KEPCO에서는 타부 서치법을 적용하고 있다[3].

하지만 현재 한전에서의 모의실험 상으로는 강동 지점 배전 계통 시스템의 부하 균등화 알고리즘에 의한 최적점을 한 번에 구하는데 시간적인 면에서 어려움을 겪고 있다. 타부 서치법의 특성상 적용 대상 시스템의 크기가 커지면 커질수록 그 해를 구하는 시간은 급격히 증가하기 때문이다.

따라서 전체 시스템을 다수개의 구역으로 나누어 각각의 최적해를 구하고, 그 해를 실 계통에 적용한다. 그림 1은 여러 개 구역 중 하나의 구역에 해당한다.

또한 구역별 최적해를 각각 실 계통에 적용하여 전체 시스템을 운전한다는 것이 전체 시스템에 대한 최적점으로 운전한다는 것을 의미하지는 않는다. 그 이유는 각각의 구역들의 상호 영향력 때문이다.

표 1 부하 균등화 알고리즘에 의한 최적해

	초기상태	재구성후
Feeder No.	Feeder 별 부하량	Feeder 별 부하량
23755	5105.1 [kW]	5105.1 [kW]
2396	4899.0 [kW]	4899.0 [kW]
26609	12852.3 [kW]	12852.3 [kW]
무 총 합	22856.45 [kW]	22856.45 [kW]
부 하 편 차	6,322 [kW]	6,322 [kW]
재구성 시 간		1 초

표 1은 한전에서 적용하고 있는 부하 균등화 알고리즘

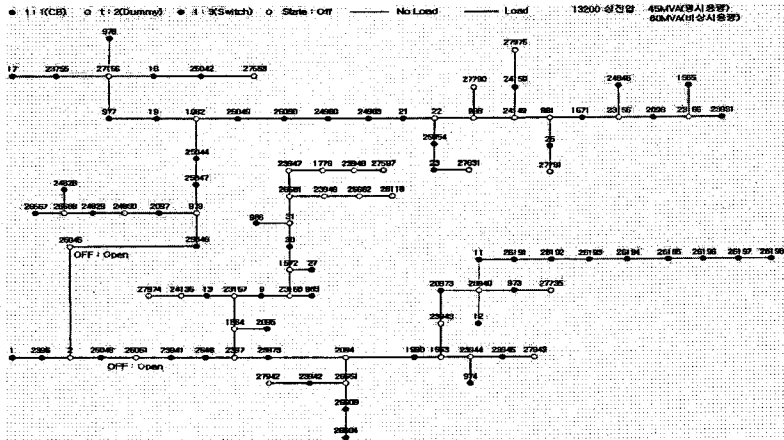


그림 1 서울 강동 지점 배전계통도

을 그림 1의 시스템에 적용한 결과로서 연산 시간은 1초가 소요되고 초기 상태로부터 더 이상 개선되지 못한 결과를 보이고 있다. 여기서 부하 편차는 각각의 피더에 할당된 부하량 중에서 최대 부하량과 최소 부하량의 차를 나타낸다.

2.3 분기 교환 알고리즘 적용

2.3.1 시스템의 구성

앞 절에서 살펴본 바와 같이 대규모의 시스템에 부하 균등화에 대한 최적점의 탐색 방법인 타부 서치법을 적용하게 되면 시간적인 면에 기인하는 문제점들을 갖게 된다.

이러한 문제점들을 해소하기 위해 본 절에서는 시간적인 측면에서 가장 유리한 이점을 가지고 있는 분기 교환 알고리즘을 사용한다.

분기 교환 알고리즘은 배전 계통 내에 존재하는 루프 구조를 해소하기 위하여 브랜치를 개방하게 되며, 이를 위하여 브랜치 개폐가 개방 데이터를 가지게 된다.

표 2 분기 교환 알고리즘을 위한 데이터 형식

Data Type for Paper					
Node Data Type	Node No.	P Load	Q Load	Voltage	
Branch Data Type	Branch No.	From Node	To Node	R	X State (On/Off)

표 2에서 보는바와 같이 개방상태에 대한 데이터를 브랜치가 가지고 있다. 따라서 브랜치의 개방이 가능하게 된다.

표 3 실제계의 데이터 형식

Data Type for KEPRI						
Node Data Type	Node No.	State(On/Off)		Type		
Branch Data Type	Branch No.	From Node	To Node	Type	Length	S

하지만 한전에서 관리하는 전력계통 시스템의 데이터는 표 3에서 보는바와 같이 개방상태에 대한 데이터를 브랜치가 아닌 노드가 가지고 있다. 또한 각 구간의 부하가 노드에 밀집한 형태가 아니라 브랜치 상에 분포되어 있음을 알 수 있다.

2.3.2 분기 교환법의 실 배전 계통 적용

앞 절에서 제시하고 있는 표 2와 표 3의 데이터 구조로 시스템을 구현해 보면 그림 2와 같다. 그림 2의 a)에서는 루프 구조를 해소하기 위하여 브랜치가 개방되었고, b)는 루프 구조를 해소하기 위하여 노드가 개방되었음을 알 수 있다. 즉 한전 시스템에 분기 교환 알고리즘을 적용하기 위해서는 b)의 구조를 a)의 구조처럼 변경해야만 한다.

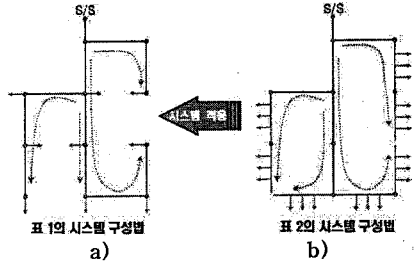


그림 2 제안된 알고리즘 및 한전 계통의 시스템 구조 차이

이를 위하여 그림 1에서 나타난 한전 계통 내에 일부 구역을 예로 들어 그림 3에서 해결 방법을 제시한다.

앞서 설명한 바와 같이 현재 한전의 알고리즘에 적용하기 위한 그림 3의 a)를 분기 교환 알고리즘에 적용하기 위하여 그림 3의 b)와 같이 구조를 바꿔야만 한다. 그림 3의 b)의 구조는 표 2에서 제시하고 있으며, 아래의 과정을 거치게 된다.

- i) 표 3에서 제시되는 데이터의 형태로부터 먼저 read되는 branch가 양단의 노드 상태를 검사하여, 개방상태를 얻게 된다. 예를 들어, 표 4에서 보듯이 36번 브랜치 데이터가 순차적으로 먼저 read된다. 따라서 Node 25051의 개방 데이터를 36번 브랜치가 얻게 된다.
- ii) 노드의 개방 데이터를 브랜치가 얻어가게 되면 해당 노드의 상태를 Open(Off)에서 Close(On)로 상태를 전환한다.
- iii) 다음으로 read되는 59번 브랜치에는 변경된 Node 상태인 Close(On)가 전달된다.
- iv) 브랜치 상에 분포된 부하 데이터를 먼저 read된 브랜치의 From Node로 이양한다.

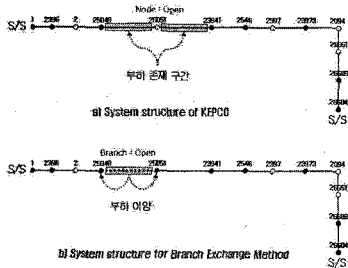


그림 3 분기 교환 알고리즘을 위한 시스템의 구조 변경

표 4 타부 서치를 위한 Branch Data 샘플

Branch No.	From Node	To Node	Line Type	Length	Load
36	25048	25051	6	50	136.4458
59	25051	23941	2	207	564.8874

상기의 방법에 의하여 현재 노드의 개방점이 브랜치로 모두 전달 가능하다. 이와 같이 구성된 배전 계통 데이터를 분기 교환법에 적용함으로써 분기 교환법에 의한 최적해를 얻을 수 있다[1][2].

참고문헌 [1][2]에서 제안하듯이 분기 교환 알고리즘을 적용하기 전 초기운전점 알고리즘을 적용하는 이유는 분기 교환법은 수렴 속도가 매우 빠르다는 장점은 있으나 시스템의 최초상태가 전역해 근처라면 전역해에 수렴이 가능한 반면 시스템의 최초상태가 전역해 근처가 아니라면 전역해에 수렴하지 못하고 지역해에 빠진다는 단점이 있기 때문이다.

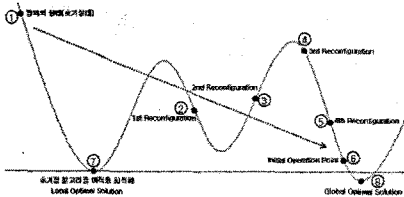


그림 4 특정 시스템에서의 해에 따른 손실의 변화

그림 4는 32개의 모선을 가지는 특정 시스템에 분기 교환법을 적용하였을 경우 해당 시스템의 해에 따른 손실의 변화 그래프이다[1]. 이를 통해 제안된 알고리즘의 특성을 살펴볼 수도 있다. 그림 4에서 각 지점별 손실의 크기는 $1 > 4 > 3 > 2 > 5 > 6 > 7 > 8$ 이다.

만약, 이 시스템에 초기운전점 선정을 위한 알고리즘을 적용하지 않고 바로 분기 교환법을 적용하면 시스템의 최초상태인 1번 지점으로부터 7번 지점의 해를 탐색한다. 그래프 상 지역해에 수렴했다는 것을 알 수 있다.

하지만 초기운전점 선정 알고리즘을 적용하였을 경우 해는 시스템의 최초상태인 1번 지점으로부터 2, 3, 4, 5번의 지점을 차례대로 거쳐 6번 지점의 해를 탐색한다. 즉, 초기운전점 선정 알고리즘의 해가 6번이 된다는 것을 의미한다. 그리고 이 6번의 초기운전점으로 상태가 변경되어진 시스템에 분기 교환 알고리즘을 적용하여 그림 4에 있는 8번 지점의 최적점을 얻게 된다.

이는 분기 교환법을 적용하면 적용 시스템의 상태에 따라 최적해를 구하지 못하고 지역해에 빠지는 특성을 가지는 반면 초기운전점을 선정 후 분기 교환법을 적용하면 최적해를 구할 수 있는 모습을 보여주고 있다.

실제로는 그림 4에서 나타나고 있는 것보다 더 많은 임계점들을 포함하겠지만 간략화한 특성곡선으로서 이와 같이 나타낼 수 있다.

표 5는 103개의 노드와 102개의 브랜치를 가지는 그림 1의 시스템을 분기 교환 알고리즘에 적용하여 그 해를 구한 결과이다. 초기운전점 선정 알고리즘을 적용하면 Node 25045의 개방점은 Node 25047로 이동되고, Node 25051의 현재 개방점은 Node 23941로 이동된다. 초기 운전점으로 변경된 시스템을 다시 분기 교환법을 적용하면 Node 25047의 개방점이 Node 25046으로 이동되고, Node 23941의 개방점이 Node 2546으로 이동된다.

표 5 분기 교환 알고리즘에 의한 최적해(103 Nodes System)

	ALGORITHM	
	Tabu Search	Branch Exchange
Feeder No.	Feeder 별 부하량	Feeder 별 부하량
23765	5105.1 [kW]	4708.81 [kW]
2396	4899.0 [kW]	8787.7 [kW]
26609	12852.3 [kW]	9359.92 [kW]
부하 총합	22856.45 [kW]	22856.45 [kW]
부하 편차	6322 [kW]	4651.11 [kW]
계통 손실	886.566 [kW]	628.8 [kW]
계구성 시간	1 초	0.0150 초

표 5에서는 타부 서치 결과와 분기 교환법에 대한 결과를 비교할 수 있다. 타부 서치 알고리즘을 적용했을 경우 부하편차가 6322[kW]인 반면 분기 교환 알고리즘을 적용했을 경우 부하편차가 4651.11[kW]임을 볼 수 있다. 또한 손실 측면에서도 타부 서치의 결과보다 29.07% 정도 개선된 결과를 보이고 있으며 계구성 시간 또한 상당히 빠르다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서 제시하는 알고리즘은 조합적인 해의 탐색이 아니기 때문에 시간적으로 매우 빠르다는 것을 기존 논문의 결과 데이터와 본 논문에서의 결과 데이터로 알 수 있다. 즉 계통의 규모가 커짐에 따라 해의 탐색시간이 선형적으로 증가한다는 것을 의미한다.

비록 부하 균등과 측면에서는 기존의 타부 서치 알고리즘을 적용한 결과가 다소 우수할 경우도 있지만, 최근의 안정적인 전력 공급의 신뢰도를 고려해 보았을 때 손실을 감소시키는 것에 가중치를 보다 더 부여하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이러한 측면에서 본 논문에서 제시하고 있는 계구성 알고리즘이 배전계통을 효율적으로 운전하기 위한 보다 적절한 알고리즘으로 판단된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[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, Mar, 2007, pp. 451-456.
- [2] Gyu-Seok Seo, Young-Sik Baek, "A Study of Reconfiguration for Load Balancing in Distribution Power System", Trans. KIEE. Vol. 56, No. 8, August, 2007, pp. 1360-1366.
- [3] 정중만, 박창호, 채우규, 장수홍, "배전계통 계구성 최적화 알고리즘 개선 적용" 추계학술대회, 2006.