

배전계통 최적 재구성을 위한 초기 운전점 선택에 관한 연구

서규석* 백영석* 김정년**
 경북대학교* LG전선(주)**

A Study of Initial Operation State for Optimal Reconfiguration 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 선로 손실, 전압조건을 계산하고 이들 중 최적인 구성을 찾아내는 것이다. 하지만 짧은 시간 내에 이에 대한 해를 찾기가 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.

하지만 계통상태가 항상 최적점 근방에 위치하는 것이 아니라는 관점에서 본다면 임의의 상태에서도 B점에 도달할 수 있는 알고리즘이 필요하다는 것을 알 수 있다. 표 1은 서로 상태가 다를 경우 기존의 방법으로 접근하여 해를 구한 결과를 보여준다.

<표 1> 서로 다른 초기 상태에서의 시뮬레이션 결과

Case	임의의 운전 상태		최적점 근처 운전 상태	
	Base Case	Optimal State	Base Case	Optimal State
Lines switched out	21-23-30 -33-34	07-13-21 -31-37	33-34-35 -36-37	9-7-14 -31-37
Total kW Loss	398.455	130.948	212.817	124.036
Worst voltage(p.u)	0.827932	0.930436	0.899638	0.939557

위의 결과로 최적점 근처에서 운전되던 상태에서부터 구해진 해가 임의의 운전 상태에서부터 구해진 해보다 손실 및 전압 특성이 뛰어나다는 것을 알 수 있다.

1. 서 론

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 초기상태에 따라 지역해를 도출한다는 단점을 가지고 있다. 한편, 시뮬레이터도 어닐링 알고리즘, 유전자 알고리즘은 전역적인 해를 제공할 수 있는 가능성은 전술한 방법에 비해서 높지만 계산시간이 많이 걸린다는 단점을 가지고 있다.

지난 논문에서는 계산 시간을 단축시키기 위해 분기교환법을 적용하여 재구성을 실시하였고, 이미 드러난 문제점과 같이 초기상태에 따라 전역 최적해를 구하지 못하는 것을 관찰 할 수 있었다.

본 논문에서는 지난 연구에 이어 현재 계통이 최적점 근방에서 운전되고 있지 않을 경우를 대비하여, 전역 최적점을 찾을 수 있도록 초기 운전점을 결정할 수 있는 알고리즘을 추가하여 분기교환법이 지역해로 빠지는 것을 방지하는 방법을 제안하였다.[1]

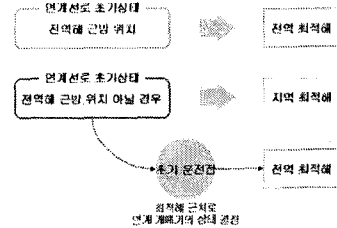
2. 본 론

2.1 최적해

기존의 논문에서는 일반적인 배전계통의 상태가 경험상 최적점 근처에서 운전된다는 가정아래 접근하였고, 그 결과로 그림 1에서의 B점에 해당하는 전역 최적해를 얻을 수 있었다.[1]



<그림 1> 지역최적해와 전역최적해



<그림 2> 연계선로 초기상태에 따른 최적해

그림 2는 연계선로의 초기상태를 최적해 근처로 결정하여 기존의 재구성 알고리즘에 적용시킨다면 원하는 전역 최적해를 얻을 수 있다는 것을 나타낸다.

2.2 문제의 정식화

전체 배전계통의 손실 최소화를 위한 목적함수는 식 1과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서 i : Node No.

대상 계통의 손실을 최소화하기 위해서는 계통의 각 구성에 대하여 목적함수를 계산하고, 그 값이 최소가 되는 구조를 선택하면 된다.

또한, 해당 루프별 손실 최소화점을 구하기 위해 식 2를 정의한다.

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

여기서, i : Node No.

D : 선로 절체로 이동될 노드의 집합.

m: 절체 전 개방 상태의 양단 전압 증 저전압 노드.
n: 절체 전 개방 상태의 양단 전압 증 고전압 노드.
E: 해당 노드 전압.

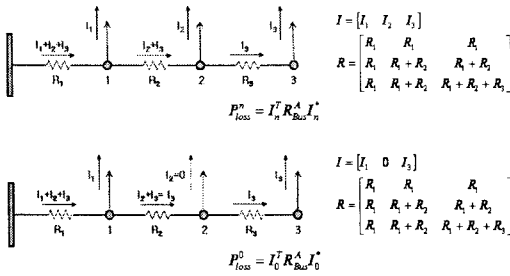
R_{loop} : 해당 루프에서의 저항 성분.

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_1 & \dots & R_1 & & R_1 \\ R_1 & R_1 + R_2 & & R_1 + R_2 & & R_1 + R_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ R_1 & R_1 + R_2 & \dots & R_1 + R_2 + \dots + R_{j-1} & & R_1 + R_2 + \dots + R_{j-1} \\ R_1 & R_1 + R_2 & \dots & R_1 + R_2 + \dots + R_{j-1} & & R_1 + R_2 + \dots + R_j \end{bmatrix}$$

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

2.3 배전계통 모델 적용 가능 판단

계통 모델 적용에 앞서 정의된 식 2를 적용하기 위하여 아래의 검증 단계를 거쳤다.



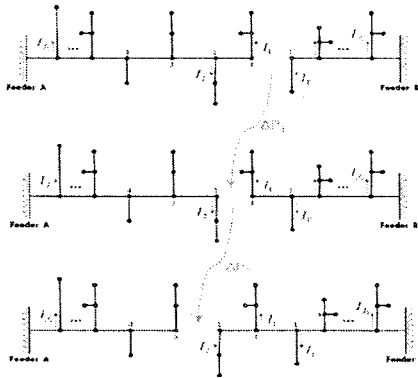
<그림 3> 계통상태 변화 시 손실변화

그림 3에서 보여지는 계통의 변화에 대해 아래와 같이 손실변화를 계산할 수 있다.

$$P_{loss}^A = P_{loss}^n - P_{loss}^0$$

$$= 2I_1 \{R_1(I_1 + I_2) + R_2 I_1\} + I_3^2 (R_1 + R_2)$$

좀 더 확장하여 루프계통에서 살펴본다면, 그림 4에서



<그림 4> 루프 계통상태 변화 시 손실변화

보는바와 같고, 이때의 손실변화는 아래의 식과 같이 표현 된다.

$$\Delta P_{loss} = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$\Delta P_1 = 2 \operatorname{Re} \left[I_1 (E_1 - E_1) \right] + |I_1|^2 R_{loop}$$

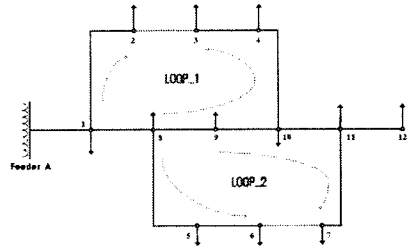
$$\Delta P_2 = 2 \operatorname{Re} \left[I_2 (E_1 - E_2) \right] + |I_2|^2 R_{loop}$$

$$\Delta P_{loss} = 2 \operatorname{Re} \left[I_1 (E_1 - E_1) \right] + 2 \operatorname{Re} \left[I_2 (E_1 - E_2) \right] + |I_1|^2 R_{loop} + |I_2|^2 R_{loop}$$

$$= 2 \operatorname{Re} \left[(I_1 + I_2) (E_1 - E_1) \right] + 2 \operatorname{Re} \left[I_2 (I_1) R_{loop} \right] + |I_1|^2 R_{loop} + |I_2|^2 R_{loop}$$

$$= 2 \operatorname{Re} \left[(I_1 + I_2) (E_1 - E_1) \right] + R_{loop} |I_1 + I_2|^2$$

여기에서 본 바와 같이 식 2는 루프계통에 적용이 가능하다. 또한 그림 5와 같은 여러 개의 루프를 포함하고 있는 계통에서도 각 루프별 독립적으로 적용 가능하다는 것을 같은 방법을 통해 알 수 있었다.



<그림 5> 다중 루프 보유 계통

따라서 실 배전계통처럼 다수개의 루프를 포함하더라도 각 루프별 최소 손실점을 구할 수 있으며, 이를 통하여 전역 최적점에 가까운 초기 운전점을 구할 수 있다.

2.4 루프 내에서 최소 손실점 결정

일반적인 배전계통에서는 평시 무효전력 보상이 보편적으로 잘 이루어지기 때문에 이상적인 배전 계통이라 가정한다면, 무효전력 성분을 무시한 유효전력 성분만으로 정의할 수 있다. 이럴 경우 위의 식 2는 아래의 식 3과 같이 변환 가능하다.

$$\Delta P = 2 \left(\sum_{i \in D} I_i (E_m - E_n) + R_{loop} \left(\sum_{i \in D} I_i \right)^2 \right) \quad (3)$$

식 3은 아래와 같이 표현 가능하고, I(x)는 부하이양에 따른 전류의 변화 성분을 의미한다.

$$\Delta P = 2I(x)(E_m - E_n) + R_{loop} [I(x)]^2$$

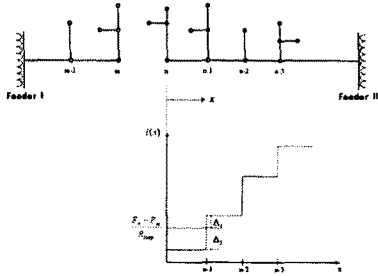
$$\Delta P = R_{loop} \left[(I(x))^2 + \frac{2(E_m - E_n)I(x)}{R_{loop}} \right]$$

$$= R_{loop} \left[I(x) + \frac{(E_m - E_n)}{R_{loop}} \right]^2 - \frac{(E_m - E_n)^2}{R_{loop}}$$

$$I(x_{opt}) = \frac{(E_n - E_m)}{R_{loop}} \quad \Delta P_{min} = -\frac{(E_m - E_n)^2}{R_{loop}}$$

I(x)에 관한 2차식으로 표현된 ΔP는 I(x)가 I(x_{opt})의 값

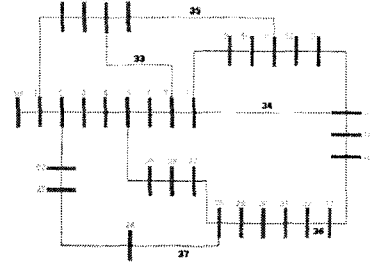
을 가질 때 손실 최소값을 가지게 된다. 이로서 각 루프별 초기상태로부터 계산된 $I(x)$ 의 값을 전류량으로 가지는 브랜치와 현재 개방되어진 브랜치의 상태를 바꾸어 줌으로써 루프 내 최소 손실점으로 접근 할 수 있다. 그림 6에서는 이에 대한 예를 보여주고 있는데 계산된 $I(x_{opt})$ 의 값이 $n-1$ 과 $n-2$ 노드를 잇는 브랜치의 전류값에 가까울 때 ($\Delta_1 < \Delta_2$), 현재 개방된 $m-n$ 브랜치를 close시키고, $n-1-n-2$ 브랜치를 open시키는 예를 보이고 있다.



<그림 6> 브랜치별 전류와 $I(x_{opt})$ 값의 상관 관계

2.5 배전계통 모델의 적용 결과

앞서 설명된 알고리즘을 그림 7의 모의 배전계통 모델에 적용하여 검토하였다.



<그림 7> 배전계통 적용 모델

그림 7은 표 1의 결과에서 볼 수 있듯이 전역 최적점 근처에서 운전되는 상태이고, 이 상태를 임의의 다른 상태로 바꾸어 초기점 알고리즘을 적용하였을 때의 최종 해와 미적용 시의 최종해를 비교함으로써 적용시의 우수함을 보였다.

초기점 알고리즘의 미적용 시 결과는 표 1(임의의 운전 상태)에서 보이고 있고, 초기점 알고리즘을 적용했을 경우의 결과는 아래 표 2에 나타내었다.

<표 2> 초기점 알고리즘 적용 시 결과

Case	초기점 알고리즘 적용		초기점으로부터의 최적해	
	Base Case	Solution	Base Case	Optimal State
Lines switched out	21-23-30 -33-34	07-11-14 -31-37	07-11-14 -31-37	9-7-14 -31-37
Total kW Loss	398.455	134.003	134.003	124.036
Worst voltage(p.u)	0.827932	0.919907	0.919907	0.939557

위에서 보는바와 같이 초기점 알고리즘을 적용했을 경우 최종해는 표 1의 최적점 근처에서 운전 상태를 유지하던 계통으로부터 구한 해와 동일 한 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 지난 논문에 이어 배전계통 운용 알고리즘 중 최적 재구성에 관한 문제를 다루었고 대상 계통이 최적점 근처에서 운전되는 상태가 아니더라도 루프별

연계 개폐기 상태를 루프 내 최소 손실점에 두고, 계통 전체 손실이 최소가 되는 해를 구해냄으로서 전역 최적해에 접근할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 기존의 분기교환법은 계통의 초기상태에 따라서 지역 최적점으로 빠질 수 있다는 단점을 가지고 있었지만, 본 논문에서 제안한 방법을 통하여 전역 최적점에 도달할 수 있다는 장점을 가진다. 또한, 최근 제안된 여러 가지 알고리즘의 경우 해를 얻는데 소모되는 시간이 상당히 길거나 혹은 시스템을 구성하는데 소요되는 비용이 적지 않으리라 짐작되지만 제안된 알고리즘을 적용함으로써 이러한 부분을 어느 정도 해소할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 경북대학교 BK21 정보기술연구 인력양성 사업단의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 서규석, 김정년, 백영식, "손실 최소화를 위한 배전계통 최적 재구성에 관한 연구" 하계학술대회, 2006.
- [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 Optertaing Spanning Tree Configuration for and Urban Power Distribution 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 SCI5263, 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.