2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

배전계통의 부하평형을 고려한 고속 계통구성방법

남 기영, 최 상봉, 정 성환, 류 희석, 김 호용
한국전기연구원

A Fast Configuration Method for Load Balancing in Distribution System

Nam Kee-Young, Choi Sang-Bong, Jeong Seong-Hwan, Ryoo Hee-Suk, Kim Ho-Yong
K.E.R.I.(Korea Electrotechnology Research Institute)

Abstract - The authors have developed a solution method based on the incremental algorithm. The optimal load balance between feeders is found through the incremental algorithm with allowing the loop configuration. Therefore loops can be configured in the resulting configuration, and then we must eliminate all loops to satisfy radiality of distribution system because the distribution system is operated under radial status. But the optimal load balance through incremental algorithm is deteriorated when the loops are eliminated. In this paper, authors propose a new method which is to improve the searching procedure of path in the incremental algorithm, that is, so as not to make loop in the path configuration.

1. 서 론

배전계통의 자동화는 전력공급신뢰도 향상에 주안점을 두고 시작되어 최근에는 경제적인 목적의 손실최소화, 부하평형 등을 염두에 두기 시작하였다. 국내의 배전자동화 시스템도 1994년 최초로 서울에 국산 개발시스템이 설치되어 현재에는 다양한 통신방식을 채택한 신뢰도 높은 시스템으로 발전하고 있으며 전국적으로 설치가 확대되고 있다. 서울이나 부산 등 대도시의 경우는 계통이 복잡하고 개폐기의 수가 많아 도시 외곽 선로의 경우처럼 고장처리 등이 배전사령원의 판단에 의한 계통재구성이 빠른 시간에 이루어 질 수 있는 소규모 시스템 환경과는 대단히 다르다. 또, 고장 지속시간에 따른 영향이 다른 지역보다 대단히 크기 때문에 고장처리와 건전구간 역송 등의 계통 재구성에 걸리는 시간을 최소화 할 필요가 있다.

본 연구에서는 손실을 줄이면서 계통고장 발생시의 고속 계통 재구성이 가능한 배선선간의 부하평형을 고려한 방법을 자원 배분문제에 이용되고 있는 축차증분법을 사용하여 구현하고자 한다.

2. 본 론

부하평형을 고려한 배전계통의 부하절체 문제는 뱅크, 배전서로 등의 용량제약, 수급 평형 제약, 방사상 계통구성 등의 제약 조건하에서 각 배전선의 부하가 평형을 이루도록 선로의 구분개폐기 상태를 바꿈으로서 운전하는 계통을 새로운 형태로 구성하는 문제이다.

2.1 문제의 정식화

배전자동화 시스템이 설치되어 있는 배전계통에서 구간부하가 개폐기 제어장치를 통해 수집이 가능하다고 하면 배전계통의 부하편형 문제는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

[목적함수]

$$\sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{k_b}(x_{bi}-a)^2 \rightarrow \text{최소화} \quad \text{-------------(1)}$$

단, $a = \sum_{b=1}^{B}\sum_{i=1}^{kb}\sum_{j\in J} Z_{bij} \Big/ p$

[제약조건]

· 배전선 전류용량 제약

$$x_{bi} \le FC_{bi} \ (i = 1,2,\cdots,k_b \ \ b = 1,2,\cdots,B) \text{ ------(2)}$$

· 뱅크전류 용량 제약

$$\sum_{i=1}^{kb} x_{bi} \le BC_b \ (b = 1,2,\cdots,B) \text{ -------------(3)}$$

· 수급평형 제약

$$\sum_{i=1}^{p} x_i = N$$

------------------------------(4)

· 전력공급 제약

$$x_{bi} = \sum_{j\in J_i} S_{bij}\cdot Z_{bij}\ ,\ \ S_{bij} \in \{0\ ,\ 1\} \text{ ---------(5)}$$

· 방사상 구성 제약

$$\sum_{i=1}^{p}\sum_{j\in J} S_{ij} = \text{총 부하노드 수 } -1 \text{ ------(6)}$$

(동시에 고립된 노드가 없을 것(모든 노드 연결))

여기서,

p:계통전체의 피더 수, i: 피터번호, b:뱅크번호, k_b:뱅크b의 피더 수, a: 피더전류의 평균치, x_{bi}:b번 뱅크의 피더i, FC_{bi}: b번 뱅크 피더i의 전류용량, J_i={j | 피더i에 접속되는 구간의 첨자집합},BC_b:뱅크b의 전류용량, B:뱅크(변압기)총수, S_{ij}:피더i의 구간j의 접속상태(開:0,閉:1), Z_{ij}:피더i의 구간j의 구간부하전류, N:총부하전류량

2.2 네트워크 제약을 가진 분산최소 자원배분 문제와 해법[7]

분산(分散)최소 자원배분 문제란 다음의 그림 2.1와 같은 네트워크 모델에서 공급점 s로부터 수요점 집합 (t_1, t_2, t_3)에 네트워크를 따라 유량을 흘릴 때 여러 가지 네트워크 제약 하에서 가능한 한 수요점에 흘러드는 유량을 같게 만드는 문제를 의미하며 다음의 식 (7)~(12)와 같이 정식화 할 수 있다.

[목적함수]

$$Min \sum_{j\in T}(x_j(\varphi)-\alpha)^2$$

-------------------------(7)

[제약조건]

$$0 \le \varphi(u,v) \le c(u,v),\ (u,v) \in E$$

------------------(8)

$$\sum_{(v,w)\in A^+(v)} \varphi(v,w) - \sum_{(u,v)\in A^-(v)} \varphi(u,v)=0,\ v\in V-T-\{s\} \quad \text{---------(9)}$$

$$\sum_{(s,v)\in A^+(s)} \varphi(s,v) - \sum_{(u,s)\in A^-(s)} \varphi(u,s) = N$$
------------------(10)

$$x_j(\varphi) \equiv \sum_{(u,j)\in A^-(j)} \varphi(u,j) - \sum_{(j,v)\in A^+(j)} \varphi(j,v) \ge 0,\ j\in T \quad \text{------(11)}$$

$$\varphi(u,v):(u,v)\in E$$
----------------------------(12)

여기서,

$x_j(\varphi)$:정점$j(j\in T)$에 흘러드는 유량의 총량, α:정점$j(j\in T)$에 흘러드는 유량의 평균치,(u,v): u에서v로 향하는 가지, $\varphi(u,v)$:절점u에서 절점 v로 향하는 유량, $c(u,v)$:각 가지의 용량,E:가지 집합, V:절점집합, s:공급점, T:$T\subseteq V$ 인 수요점 집합, $A^+(v)(A^-(v))$:v를 시점(종점)으로 하는 가지 집합

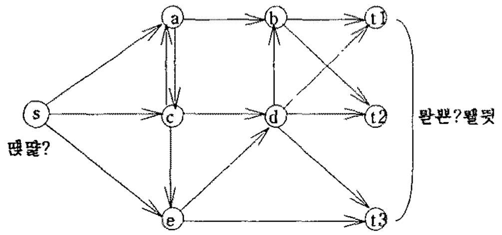

그림 2.1 자원배분 문제의 네트워크 모델 예

2.3 축차증분법

분산최소화 자원배분 문제는 다음의 축차증분법에 의해 최적해가 얻어진다.[7]

STEP1. x=(0,0,…,0)로 둔다.

STEP2. 다음의 식(13)을 만족하는j^*를 찾아서 $x_j^*=x_j^*+1$로 둔다

$$d_j^*(x_j^*+1)=\min\{d_j(x_j+1)|j=1,2,\cdots,p\} \quad \text{-------(13)}$$ 단, $d_j(x_j)=f_j(x_j)-f_j(x_j-1)$, $f_j(-1)=f_j(0)$

STEP3. $\sum_{j=1}^{p} x_j = N$ 이면 종료하고 그렇지 않으면 STEP2로 돌아간다.

2.4 배전계통의 부하평형 문제의 분산 최소화 자원배분 문제와의 대응

그림 2.1에서 발상을 역으로 하여 그림2.2와 같은 배전계통의 대응 네트워크를 생각하여 배전계통의 부하가 공급단에 흘러들어오고, 전체의 개폐기는 閉 상태로, N을 정수로 표현되는 총 전류치로 가정하기로 한다.

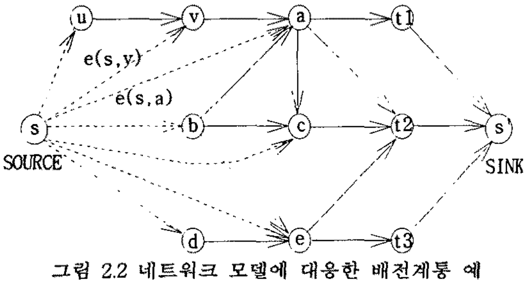

그림 2.2 네트워크 모델에 대응한 배전계통 예

그림 2.2에서 (t_1, t_2, t_3)는 배전선의 공급단으로 하고 그 이외의 노드는 구간부하(집중부하), 노드간을 접속하는 선(아크)은 전류용량 제약 $c(u,v)$인 구간개폐기로 간주한다. 또, s를 가공의 소스 노드로 하고, 전체 부하노드는 소스 노드로부터 가공의 아크$e(s,k)$로 접속되어 점선은 각 노드에 부하전류를 공급하는 유한 용량의 선로로 생각하면 $e(s,k)$의 전류용량은 $\varphi(s,k)=c(s,k)$가 된다.

이러한 고찰에 의해 배전계통의 부하 평형문제는 분산최소 자원배분 문제에 물리적인 대응이 가능하므로 배전계통의 부하평형 문제에 상기의 축차증분법을 적용하는 것이 가능하다.

2.5 해법

본 논문에서 배전선간의 평형을 고려한 배전계통 구성방법을 찾는 전체적인 해법은 다음의 그림 2.3과 같다.

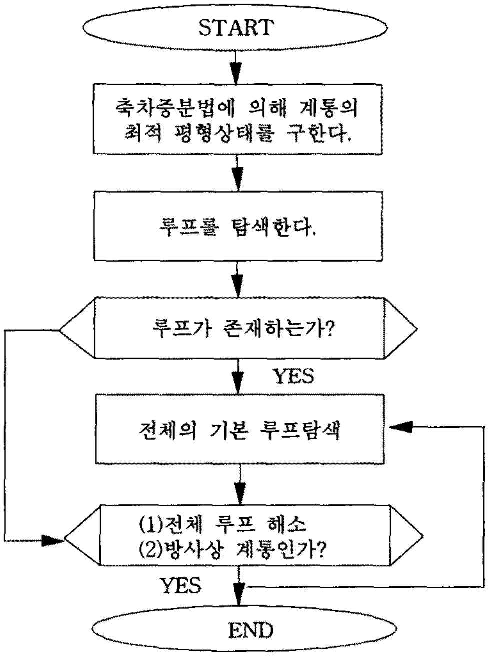

그림 2.3 전체 해법의 흐름도

우선 최초로 축차증분법을 적용하여 최적의 평형상태를 구한다. 그런데 이 상태에는 최초에 전체의 개폐기를 閉상태로 하여 구성된 계통이기 때문에 루프가 존재할 가능성이 있다. 따라서 루프가 존재하는 경우는 방사상 구성을 구하기 위해 루프를 해소하지 않으면 안 된다.

2.5.1 루프의 탐색과 해소

루프에는 공급단을 1개만 경유하는 경우의 루프와 2개 이상의 공급단을 경유하는 경우의 루프로 나누어 방법을 모색할 필요가 있다. 즉, 축차증분법으로 구한 최적 평형 계통에서 TREE와 LINK를 찾는 것에 의해 계통 전체의 기본 루프를 찾고 그 기본 루프를 해소함으로써 방사상 계통구성을 구한다.

그러나 루프를 해소하면 평형상태가 영향을 받게되는데 루프를 해소하는 순서에 따라 평형의 정도가 달라진다. 이와 같은 이유 때문에 루프를 해소하는 순서를 고려하여 최적치의 평형을 가능한 한 적게 영향을 받도록

루프를 해소하는 방법을 모색하여야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 이를 위해 다음과 같은 루프 해소기준에 따라 탐색된 루프를 해소하여 가능한 평형도의 저하가 적어지도록 하고 있다.

축차중분법을 적용한 후 최적 평형상태가 구해진 그림 2.4와 같은 모델을 통해 이 기준을 정리하였다.

그림 2.4에서 각 노드의 번호는 부하량을, 가지(브랜치)의 수치는 해당 가지를 통과하는 전류량을 의미한다.

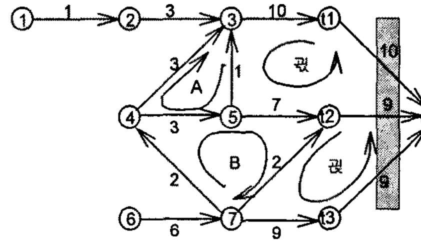

그림 2.4 축차중분법에 의한 최적 평형 계통 예

(1) 공급단을 2개 이상 경유하지 않는 루프의 해소

루프를 구성하는 가지 중에서 전류치가 최소인 가지를 찾아서 그 가지가 속해 있는 루프부터 해소한다. 그림 2.4에서 루프의 해소방법은 루프 A와 B를 대상으로 구성된 가지 중 통과전류가 가장 적은 루프 A의 (③,⑤)가지에 가장 적은 1이 흐르므로 이와 반대 방향으로 가상의 전류를 흘린다고 생각하면 여기에 관련된 각 가지의 전류가 변하고 (③,⑤)=0 이 되므로 해당 가지가 개방되어 루프 A는 해소된다.

(2) 공급단을 2개 이상 경유하는 루프의 해소

그림 2.4에서 루프 C,D의 경우는 공급단을 각각 2개씩 경유하여 루프가 구성되고 있음을 알 수 있다. 공급단을 2개 이상 경유하지 않는 루프를 모두 해소하고 난 후 이 루프를 해소하게 되는데 (1)의 경우와는 달리 이 경우에는 절단되는 가지에 따라 부하의 공급단과 공급단의 부하평형 상태가 변하게 된다..예를 들어 그림 2.4에서 (1)을 하고 난 후는 부하평형이 그대로 유지되지만 (2)의 루프를 해소한 후는 그림 2.5와 같이 절단하는 가지에 따라 계통구성 및 평형상태가 바뀌게 된다.

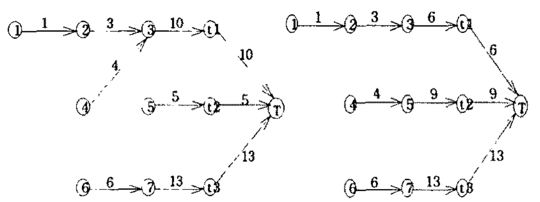
그림 2.5 전체루프를 해소한 후의 계통구성 예

2.5.1 루프의 해소 기준

이상에서 알 수 있듯이 루프를 해소할 때 축차중분법에 의해 구해진 최적의 평형상태가 변하게 되므로 이의 영향을 최소로 하여 최적에 가장 가까운 해를 얻기 위해서는 루프를 해소하는 기준이 필요한데 본 논문에서는 다음과 같은 방법을 제안한다. 우선 순서는 다음의 (1), (2)의 기준을 순서대로 수행한다.

(1) 공급단을 2개 이상 경유하지 않는 루프 해소기준

이와 같은 루프를 구성하는 가지 중에서 전류치가 가장 적은 가지를 찾아서 이 가지가 소속된 루프를 해소한다. 즉 루프를 해소한 후 공급단을 2개 이상 경유하는 루프의 가지 전류치에 미치는 영향을 가능한 최소로 하기 위함이다.

(2) 공급단을 2개 이상 경유하는 루프 해소기준

우선 식 (15)에 의해 $\overline{\sigma_k}$이 최소가 되도록 하는 가지를 각 루프에 절단할 가지의 후보로 결정한다. 단 이 경우 루프 전류에 의해 변화하는 피더의 전류치가 용량제약을 위반하는 경우에는 다음으로 $\overline{\sigma_k}$의 값이 작아지는 가지를 해소할 루프의 루프 전류치로 한다.

$$\sigma_k = (f_{k1} - a_v)^2 + (f_{k2} - a_v)^2 \text{ -----------(14)}$$

$$\overline{\sigma_k} = (f_{k1} + \Delta L_k - a_v)^2 + (f_{k2} - \Delta L_k - a_v)^2 \text{ ---(15)}$$

$$\sigma = \sigma_k - \overline{\sigma_k}$$
-------------------------------(16)

여기서, ΔL_k:루프 k의 루프 전류치, f_{k1}, f_{k2}:루프 k를 구성하고 있는 2개의 피더, σ_k:루프 k의 해소 전의 분산, $\overline{\sigma_k}$:루프 k의 해소 후의 분산, σ:루프의 분산 인덱스

다음으로 전체의 루프에 대해 식(16)의 σ를 계산하여 가장 큰 σ를 가진 루프 k를 우선하여 식(15)에서 결정한 가지를 절단하여 루프를 해소한다. 이 때 부하평형은 저하되지만 가능한 한 그 정도를 작게 함으로써 다른 방법에 의해 루프를 해소하는 방법 보다는 평형상태가 나은 해를 얻을 수 있는 가능성이 크다고 할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 배전계통에서의 평상시의 부하 평형 문제를 네트워크 제약 하에서의 자원배분문제로서 모델화하여 이 문제를 풀기 위해 자원 배분문제의 해법의 한가지인 축차중분법을 적용하였다. 네트워크 제약 하에서의 자원배분 문제의 해는 방사상 구성을 항상 제공하지 않기 때문에 여기서 루프가 남을 경우는 최종 목적으로 하는 평형이 고려된 방사상 계통구성을 얻기 위해 축차중분법에서 구한 최적 평형 상태에 가능한 한 영향을 적게 하도록 루프를 해소하는 기준을 제시하였다.

향후 종래의 기법과의 비교를 통하여 본 기법의 타당성을 검증할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1]K.Aoki, K.Nara, T,Satoh, M.Kitagawa, K.Yamanaka, "NEW APPROXIMATE OPTIMIZATION METHOD FOR DISTRIBUTION SYSTEM PLANNING", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.5,No.1,Feb.1990

[2]K.Nara,et al. "DISTRIBUTION SYSTEMS EXPANSION PLANNING BY MULTI-STAGE BRANCH EXCHANGE", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7,No.1,Feb.1992

[3]Dariush Shirmohammadi,et.al. "Reconfiguration of electric Distribution Networks for Resistive Line Losses Reduction", 1988 IEEE/PES, Summer Meeting 88SM598-5

[4]Vesna Borozan,et.al. "Improved Method for Loss Minimization in Distribution Networks" 1995 IEEE/PES Winter Meeting 95WM125-5PWRS

[5]Mesut E.Baran,et.al. "Network Reconfiguration Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing", April"A1989"AIEEE Transactions on Power Delivery Vol.4, No.2

[6]D.W.Rossetal."Development of Advanced Methods for Planning Electric Energy Distribution Systems", U.S.DOEReport,ET-78-C-03-1845,Feb,1980

[7]加藤直木, "離散構造とアルゴリズムI-ばらつき最小化組み合わせ問題", 1993, 近代科學社