

손실감소와 부하균등지수를 고려한 실시간 전문가 시스템

· 김정년, 백영식
경북대학교 전기공학과

Real-Time Expert System With Loss Reduction And Load Balancing

· Jung-Nyun Kim, Young-Sik Baek
Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ.

Abstract - This paper describes methods to quickly reconfigure the branch in a distribution system by using tie-line switches without branch overloading and feeder overloading, voltage in load points, and distribution system is represented by object-based structure to search efficiently.

1. 서론

전력계통이 거대화됨에 따라 전력공급에 대한 신뢰도는 한층 더 높아지고 있다. 전력계통의 최종단계인 배전계통의 경우 직접적으로 일반 수용가와 연결되어 있기 때문에 계통의 안정적인 공급이 더욱 더 중요한 문제로 대두되고 배전계통 자동화와 같은 계통의 최적운영에 의해 합리적이고 경제적인 운용이 필요하게 된다.

일반적으로 배전계통은 중앙제어센터에서 운용자가 계통의 사고를 감시하고 정전시에는 정전구역을 최소화시키기 위해서 정전구간의 부하를 인접한 건전구간으로 절체하게 된다. 또한 정상운전시에도 부하의 상태를 감시하여 계통을 재구성함으로써 운전손실을 최소화시키는 방향으로 계통의 재구성할 수 있다. 계통 운용자는 이러한 부하의 절체에 따른 문제를 신속하게 처리하기에는 계통자체가 너무 방대하고 복잡하기 때문에 컴퓨터의 도움을 받아야만 한다.

배전계통의 구성자체가 복잡하고 여러 가지 제약조건이 수반되므로 수치해석적인 방법으로는 한계를 드러내게 된다. 최근에는 Taylor 등이 효율적인 부하 절체방안으로 계통을 재구성하는 최적 우선트리 탐색법을 이용한 전문가 시스템을 제안하였다.

본 연구에서는 계통의 손실감소와 부하균등배분을 고려해서 계통의 효율적인 운전상태를 연구한다. 객체지향적인 프로그래밍방식인 OOP를 이용해서 계통자체를 트리로 구성하며 트리 탐색법을 이용해서 계통의 최적재구성 방안을 모색한다.

2. 문제 정의

주어진 배전계통의 운용최적화 문제는, 선로절체에 따라 달라지는 수많은 모든 가능한 계통구성들에 대해 선로손실, 전압조건 및 부하균등화를 계산하고 이들 중 최적적인 구성을 찾아내는 것이다. 따라서 가장 정확한 방법은 모든 경우에 대한 계산을 근거로 찾아내는 방법일 것이다. 그러나 이것은 계통이 커지면 불가능해진다.

본 연구에서 사용한 배전계통 최적 재구성은 부하를 이양하는 과정에서 다음과 같은 제약조건을 만족하도록 하였다. 첫째, 시스템전체 손실이 감소하는 방향으로 부하 이양을 한다. 둘째, 각각의 변압기마다 부하가 균등하게 배분되도록 재구성해야만 한다. 그리고 셋째, 각 부하점에서 전압의 제약조건에 만족하도록 해야만 한다. 이 방법은 현재의 운전상태로부터 계속 최적화를 시켜가는 방법이다. 이론적으로는 모든 가능 구성에 대해 계

산하여야만 하나, 실제 최적화 계통구성은 계통계획 과정에서 고려가 되어 있으며, 경험상 최적에 가까운 구성으로 운용이 되고 있을 것이다. 따라서 본 방법은 실용적으로 사용이 가능할 것으로 사료된다.

우선 배전계통 최적화 문제를 효율적으로 계산하기 위해서는 배전계통의 조류계산을 정확하고 빠른시간내에 구할 수 있어야한다. 배전계통은 다음 그림 1. 과 같이 방사상 운전조건을 만족해야 하며 전력 방정식은 다음과 같은 식을 사용한다.

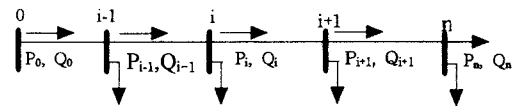


그림 1 방사상 계통

$$P_{i+1} = P_i - r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - P_{Li+1} \quad (1)$$

$$Q_{i+1} = Q_i - x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} - Q_{Li+1} \quad (2)$$

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (3)$$

$z_i = r_i + jx_i$: 선로 i의 임피던스

P_i, Q_i : 선로 i에서의 유효, 무효전력

P_{Li}, Q_{Li} : 노드 i에서의 부하량

첫 번째 노드에서 P_0, Q_0, V_0 는 알고 있는 값이라면 이하의 다른 노드에서 전압과 유효 전력을 순차적으로 구할 수 있다. 이 과정을 Forward Update라 한다. Backward Update 과정의 식은 다음과 같이 주어진다.

$$P_{i-1} = P_i + r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} + P_{Li} \quad (4)$$

$$Q_{i-1} = Q_i + x_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} + Q_{Li} \quad (5)$$

$$V_{i-1}^2 = V_i^2 + 2(r_i P_i + x_i Q_i) + (r_i^2 + x_i^2) \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (6)$$

여기서, $P_i = P_i + P_{Li}$, $Q_i = Q_i + Q_{Li}$

3. 배전계통의 객체지향적 모델링

배전계통의 구조는 상당히 복잡하고 운용은 수치구조이지만 실제 모양은 환상 구조이며, 이들 구조가 선로 절체에 따라서 변화하므로 이를 나타내고 표현하는데는 많은 어려움이 따르며 프로그램으로 나타내기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 객체지향기법을 사용하여 선로 연결성을 나타냄으로써 선로 구조의 변경에 쉽게 대응할 수 있는 방법을 개발하여 사용하였다.

본 논문에서 사용한 클래스와 그것의 객체로서 표현은 다음과 같다. 그림 2는 선로들의 리스트를 가리키기 위한 리스트객체이다.

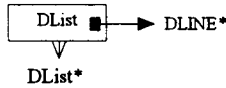


그림 2 List 객체

그림 3는 배전선로를 객체화 한 것이며 그 양쪽에는 연결된 노드를 가리키는 포인터가 있으며 이를 통해 메시지의 전달 및 탐색을 하게 된다.



그림 3 DLINE 객체

그림 4는 모선 객체로서 선로가 연결되어야만 한다. 연결된 선로의 개수는 시스템의 규모에 따라 또는 상태에 따라 틀리므로 동적으로 필요시 할당해서 사용할 수 있어야 한다. 그러기 위해서 리스트 객체를 통해 모선에 연결된 선로를 가리키는 구조이다.

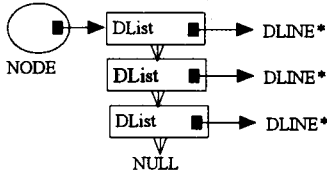


그림 4 Node 객체

그림 5는 전원 공급점의 객체로서 하위의 배전계통에 전원을 공급하는 원천으로 연결된 배전 선로를 통해 전력을 전달한다.

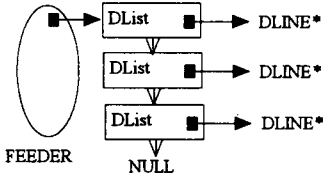


그림 5 FEEDER 객체

4. 최적화 문제

본 논문에서는 목적함수로서 시스템손실과 부하균등배분을 고려한다. 전력의 손실감소의 경우 시스템손실을 최소화 시키는 방향으로 계통을 재구성하고 시스템 전체 손실은 다음과 같다.

$$\text{Min}(P_{\text{loss}}^{\text{sys}}) = \text{Min}\left(\sum r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2}\right) \cdot p \cdot u \quad (4)$$

$$\text{Min}\left(\sum \left(\frac{S_i}{S_i^{\text{max}}}\right)^2\right) = \left(\sum \frac{P_i^2 + Q_i^2}{S_i^{\text{max}2}}\right) \quad (5)$$

계약조건은

$$\text{전압 제약조건} \quad V_i^{\text{min}} \leq V_i \leq V_i^{\text{max}}$$

$$\text{선로용량 제약조건} \quad S_i^2 \leq S_i^{\text{max}2}$$

손실 추정

주어진 계통에서 계통구조를 변경시키는 방법은 상당히 많으나, 한번에 한 선로만을 변경시킨다면 그 수효는 제한된다. 각 변경 가능 선로 중 예 우선 손실이 가장 많이 줄어드는 선로를 변경 선로로 선택한다. 이 과정은 많은 전력조류를 필요로 하므로, 본 연구에서는 변경 후 변화

는 선로손실을 간략화 식을 사용하여 모두 구하고, 손실이 최소가 되는 구조에 대한 전력조류만을 수행하였다. 이런 방법을 계속 사용하여 손실이 줄어들지 않을 때까지 계산하고, 이때의 구조를 최적구조로 보았다. 손실 추정 알고리즘은 다음과 같다. 우선 한 배전선로에서 손실은 다음 식과 같다.

$$P_{\text{loss}}^i = r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \approx r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (7)$$

그리고 이때 전체 시스템 손실은

$$P_{\text{loss}}^{\text{sys}} = \sum r_i (P_i^2 + Q_i^2) \quad (8)$$

브랜치교환에 의한 손실감소는 다음 시스템에서 살펴보자. 그림 6에서 왼쪽으로 경로 0, m, ..., k-1, k를 통해 최종 노드인 k까지 부하에 전력을 공급하고, 오른쪽으로 경로 0, i, n-1, n을 통해서 최종 노드인 n까지 부하를 공급한다. 이때 만약 배전 선로 b를 닫으면 루우프가 형성되는데 방사상 운전 조건을 만족하기 위해서 m, ..., k-1, k선로 중 하나를 열어야만 한다. 이때 만약 m선로를 열었을 때 시스템 손실 감소량의 예상치는 다음과 같다.

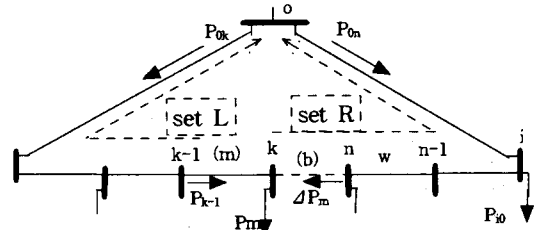


그림 6 선로 절체

$$\begin{aligned} \Delta LP_m^{\text{est}} &= 2P_m \left(\sum_{i \in L} r_i P_i - \sum_{i \in R} r_i P_i \right) \\ &+ 2Q_m \left(\sum_{i \in L} r_i Q_i - \sum_{i \in R} r_i Q_i \right) \\ &- (P_m^2 + Q_m^2) \left[\sum_{i \in R \cup L} r_i \right] \end{aligned} \quad (6)$$

표 2 샘플 시스템

NO	From	To	R	X	PL(To)	QL(To)	V(To) ²	Switch
1	0	1	0.0000	0.0000	0	0	0.9927	Closed
2	1	2	0.4930	0.2511	90	40	0.9574	Closed
3	2	3	0.3660	0.1864	120	80	0.9374	Closed
4	3	4	0.3811	0.1941	60	30	0.9176	Closed
5	4	5	0.8190	0.7070	60	20	0.8707	Closed
6	5	6	0.1872	0.6188	200	100	0.8641	Closed
7	6	7	0.7114	0.2351	200	100	0.8550	Closed
8	7	8	1.0300	0.7400	60	20	0.8432	Closed
9	8	9	1.0440	0.7400	60	20	0.8324	Closed
10	9	10	0.1966	0.0650	45	30	0.8308	Closed
11	10	11	0.3744	0.1238	60	35	0.8280	Closed
12	11	12	1.4680	1.1550	60	35	0.8167	Closed
13	12	13	0.5416	0.7129	120	80	0.8125	Closed
14	13	14	0.5910	0.5260	60	10	0.8099	Closed
15	14	15	0.7463	0.5450	60	20	0.8074	Closed
16	15	16	1.2891	1.7210	60	20	0.8037	Closed
17	16	17	0.7320	0.5740	90	40	0.8026	Closed
18	1	18	0.1640	0.1565	90	40	0.9916	Closed
19	18	19	1.5042	1.3554	90	40	0.9845	Closed
20	19	20	0.4095	0.4784	90	40	0.9831	Closed
21	20	21	0.7089	0.9373	90	40	0.9818	Closed
22	2	22	0.4512	0.3083	90	50	0.9504	Closed
23	22	23	0.8980	0.7091	420	200	0.9373	Closed
24	23	24	0.8960	0.7011	420	200	0.9309	Closed
25	5	25	0.2030	0.1034	60	25	0.8643	Closed
26	25	26	0.2842	0.1447	60	25	0.8557	Closed
27	26	27	1.0590	0.9337	60	20	0.8201	Closed
28	27	28	0.8042	0.7006	120	70	0.7945	Closed
29	28	29	0.5075	0.2585	200	600	0.7816	Closed
30	29	30	0.9744	0.9630	150	70	0.7739	Closed
31	30	31	0.3105	0.3619	210	100	0.7723	Closed
32	31	32	0.3410	0.5302	60	40	0.7717	Closed
33	7	20	2.0000	2.0000	-	-	-	Open
34	8	14	2.0000	2.0000	-	-	-	Open
35	11	21	2.0000	2.0000	-	-	-	Open
36	17	32	0.5000	0.5000	-	-	-	Open
37	24	28	0.5000	0.5000	-	-	-	Open

이 결과가 $\Delta P_{loss} > 0$ 경우는 변경가능후보로 선택이 되고 $\Delta P_{loss} < 0$ 경우에는 변경가능 후보에서 제거 시킨다. 그리고 변경 가능 후보로 선택된 것 중에서 가장 큰 손실을 선택해서 변경을 시도한다.

절체할 경우 여러 후보선로들 중 다음과 같은 조건을 만족하도록 후보를 선택한다.

-선로손실 감소가 가장 큰 배전선로 순으로 선로절체를 행한다.

-선택된 선로에 대하여 OFF해야할 선로는 전압이 낮은 모선측에 연결된 배전선로를 택한다.

-전압이 낮은 모선측의 배전선로들 중 루우프(폐경로)를 이루는 선로중 하나를 OFF해야할 선로로 택한다.

5. 모의 결과

본 알고리즘의 유효성을 검증하기 위하여 표 1과 같은 배전계통을 예로 들었다.

이 계통은 12.66KV시스템으로 2피더 32모선 5개의 루프스위치를 가지고 그림과 같이 운전되고 있다.

표 3 최적화 수행과정

단계	경우 1			경우 2			
	후보선로		손실추정[kW]	후보선로		손실추정[kW]	
	On	Off		On	Off		
1	37	28	20.2754	31	32	-2.24672	
	36	17	-0.0188069	23	24	56.5127	
1	35	11	41.3682	20	33	48.997	
	34	14	5.32269	13	14	-0.224552	
	33	7	45.6404	9	10	0.534013	
	<3-7> 선택 손실 : 146.635[kW]			<23-24> 선택 손실 260.526[kW]			
	2	37	28	-1.28066	31	32	1.11408
		36	17	-0.641739	24	37	37.838
		35	11	15.1912	20	33	43.8801
34		14	5.32007	13	14	-0.22584	
7		33	-44.2928	9	10	0.534207	
<35-11> 선택 손실 : 132.852[kW]			<20-33> 선택 손실 204.682[kW]				
3	37	28	-1.28066	33	7	43.0699	
	36	32	1.43045	31	32	-0.104087	
	34	14	1.70735	24	37	33.2852	
	11	35	-14.918	13	14	12.5134	
	7	6	-0.279341	9	8	21.2797	
	<34-14> 선택 손실 : 131.732[kW]			<33-7> 선택 손실 164.308[kW]			
4	37	28	-1.28066	31	32	-0.837127	
	36	32	1.7436	24	37	23.2748	
	14	34	-1.56652	13	14	5.18345	
	11	10	0.631174	9	8	-8.68739	
	7	33	-25.1437	7	33	-41.1251	
	<36-32> 선택 손실 : 129.534[kW]			<24-37> 선택 손실 137.476[kW]			
5	37	28	-1.69973	37	28	-2.2916	
	32	31	-2.99888	31	32	4.76425	
	14	34	-2.24366	13	14	5.18345	
	11	10	0.786141	9	8	-8.68739	
	7	33	-26.4832	7	33	-30.5604	
	<10-9> 선택 손실 : 127.889[kW]			<13-14> 선택 손실 130.907[kW]			
6	37	28	-1.69973	37	28	-2.2916	
	32	31	-2.50751	31	32	2.52174	
	14	34	-3.6299	14	34	-10.2615	
	10	9	0.597202	9	8	-9.65713	
	7	33	-23.4218	7	33	-22.2954	
	<10-9> 선택 손실 : 127.889[kW]			<31-32> 선택 손실 127.889[kW]			
7	37	28	-1.69973	37	28	-1.69973	
	32	31	-1.93591	32	31	-1.93591	
	14	34	-5.28231	14	34	-5.28231	
	9	8	-5.35569	9	8	-5.35569	
	7	33	-20.2195	7	33	-20.2195	
	there is no more selection			there is no more selection			

표2에 제시한 결과는 두 가지 경우에 대해서 최적 재구

성을 하였다. 첫 번째 경우는 초기 상태에서 개방된 선로가 37, 36, 35, 34, 33이고 두 번째 경우는 31, 24, 20, 13, 9이다. 두 경우 다 같은 최종상태에 도달한 것을 볼 수가 있다. 경우 1에서 초기 상태에서 시스템의 손실은 146.635(kW) 였고, 그리고 노드중 가장 낮은 전압은 Node17에서 0.891535(p.u)였다. 이러한 시스템에서 최적 재구성 수행한 후 시스템 손실은 127.889(kW)로 감소했으며 전압은 0.916058 (p.u)로 개선되었다.

또한 표 2에서 서로 다른 초기조건에서도 최종적인 재구성 결과는 동일하다. 즉, 배전계통의 구성, 배전선로의 조류, 부하점의 전압 등이 동일하다. 그러므로 어떠한 초기조건에 대해서도 최적해에 도달한 다는 것을 할 수가 있다.

6. 결 론

본 연구에서 사용한 배전계통 최적재구성은 부하를 이양하는 과정에서 다음과 같은 제약조건을 만족하도록 하였으며 시스템전체 손실이 감소하는 방향으로 부하 이양을 하였다. 또한 각각의 변압기마다 부하가 균등하게 배분되도록 재구성하였으며 각 부하점에서 전압의 제약조건에 만족하도록 하였다.

배전계통을 표현함에 있어 객체개념을 도입하여 배전계통을 구성하고있는 요소를 객체로 모델링하고 그 객체를 서로 연결함으로써 배전계통을 구성할 수 있었다.

또한 본 방법을 예제 시스템에 적용시킨 결과 서로 다른 초기 조건에서도 같은 최적점에 도달하였다.

참고문헌

- [1] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems For Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989
- [2] Mesut E. Baran, Felix F. Wu, "Network Reconfiguration In Distribution Systems For Loss Reduction And Load Balancing", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [3] V. Glamocanin "Optimal Loss Reduction Of Distribution Networks", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 5, No. 3, August 1990
- [4] "Bibliography on Distribution Automation", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, June 1984, pp1176-1182