

지식베이스를 이용한 배전계통의 최적재구성

조시형* 최병윤** 김세호*** 이재관*

* 한전 서울연수원 ** 한전 기술연구원 *** 제주대학교 전기공학과

The Optimal Distribution Feeder Reconfiguration Using Knowledge Base

S.H.Cho* B.Y.Choi** S.H.Kim*** J.K.Lee*

* KEPCO Seoul Training Center ** KEPCO Research Center ***Cheju University

ABSTRACT

This paper presents an approach to feeder reconfiguration in order to achieve an efficient operation of distribution systems utilizing knowledge base. The optimal feeder reconfiguration in this study eliminates various abnormal states which will create feeder overloads and feeder constraint problems, and will also accomplish minimum power loss of the distribution systems under normal operating condition by means of branch exchanges to change the status of sectionalizing switches with experiences of the experts.

For an effective implementation of feeder reconfiguration, a best-first tree searching strategy based on heuristics is employed to evaluate the various alternatives of load transfer. The heuristic exchange of branches results in reduction of the search space as a means of implementing the best-first searching strategy.

1. 서론

생활수준의 향상, 국가산업과 문화생활의 전력에너지에 의존도 심화는 전력회사에게 경제적이며, 무정전인 전력공급을 요구하게 된다. 게다가 각종 컴퓨터, 장거리 통신분야의 괄목할 만한 성장으로 배전계통의 효율적인 운영을 위한 배전자동화(Distribution Automation System : DAS) 연구가 우리나라에서도 곧 실계통에 시험 적용될 예정이다. 이 DAS가 효율적으로 운영되고, 경제적인 전력공급을 하기 위해서는 하드웨어와 마찬가지로 배전선로 고장탐지 기법, 원격감시, 제어 기법, 안전도제어 기법, 손실감소 기법 등의 소프트웨어의 지속적인 연구가 필요하므로, 배전계통의 특성에 적용하고 DAS의 경제적인 이득을 최대화하기 위한 배전선로 손실감소 기법의 필요성이 증대되고 있다.

이러한 필요성에 따라 본 연구에서는 정상운영 조건하에서 전문가의 경험을 이용하여 개폐기의 개/폐 조작을 통한 분기교환으로 배전시스템의 각종 이상상태를 제거하고, 선로의 최소 손실화를 위한 선로재구성을 수행하여, 배전계통의 최적 운영조건을 확립하고자 한다. 여기서 선로재구성을 수행할 때 가능한 분기교환 방안을 찾기 위해서, 배전선로에서 가능한 모든 구성을 탐색하여 평가하는 것은 그 경우의 수가 너무 많기 때문에 비 실용적이므로, 이를 줄이기 위한 경험적 탐색과정이 제시된다. 이 과정은 전문가의 오랜 경험에 의해 축적된 경험법칙에 기본을 두고 결정트리 해석기법, 분기교환을 위한 최적 우선 탐색기법을 사용하여 이의 수행시간을 단축하고 더욱 효율적인 결과를 얻을 수 있는 방안을 제시할 수 있다.

2. 배전계통의 선로재구성

배전계통은 특성상 부하 추종적으로 구성되어 수시로 확

장, 축소가 필요하고, 연계개폐기로 연결되는 타이, 루프 지점을 이용하여 수행되는 개폐기 조작으로 분기교환이 빈번하게 발생하여 계통상태의 변화가 심하므로 기존의 수치해석적 알고리즘으로 다루기에는 비효율적이다.

따라서 이러한 특성을 가진 배전계통의 최적운영을 위하여 일정한 시스템의 조건을 만족시키면서 전력손실을 최소화시키고, 부하균형을 이루는 수직상 구조의 시스템을 유지시키는 개폐기의 상태를 규정하는 선로재구성을 효율적으로 수행하기 위한 기본적인 구성요소는 크게 변전소 주 변압기, 개폐기, 배전선로, 선로구간, 기준조건 등으로 나눌 수 있다.

2.1 선로재구성의 장점

배전선로를 운영하는 전력회사의 입장에서 선로손실의 줄이기 위한 여러가지 방안이 있으나, 본 연구에서는 배전자동화의 경제적인 이득을 최대화시킬 수 있는 배전선로의 재구성을 다루었으며, 이의 장점은 다음과 같다.

- 0 선로 용량초과 제거
- 0 손실 최소화
- 0 각 배전선로의 부하균형
- 0 전압상태의 개선
- 0 시스템의 신뢰도 향상
- 0 부하 다양성의 적극적인 활용

2.2 선로재구성의 적용 단계

효율적인 배전계통의 운영을 위한 최적 분기교환 방안을 규정하기 위한 선로 재구성은 다음과 같이 적용한다. 여기서 1순위 선로는 과부하 선로에 직접 연계된 선로를 말한다.

1단계 : 시스템의 과부하 정도가 제일 심한 선로부터 시작한다
2단계 : 과부하 선로와 1순위 선로 사이의 모든 연계개폐기를 식별한다.

여기서 이러한 연계개폐기의 집합을 집합 A로 표시한다.
3단계 : 연계부분에서 선로 용량기준을 초과하는 후보개폐기는 제거한다.

여기서 연계개폐기가 있는 정상개방 구간의 허용용량과 교환될 말단구간의 부하 사이에 간단한 대수적 비교를 수행한다.

4단계 : 과부하 선로와 1순위 선로 사이에 분기교환을 수행한 후의 상태에 따라 다음과 같이 집합 A는 분류된다.

$$A = P_1 \cup P_2 \cup P_3 \cup P_4 \quad (2.1)$$

여기서 $P_1 - P_4$ 는 다음과 같은 과정에서 얻어진다 : 집합 A에서 연계개폐기를 구하고, 과부하 선로에서 1순위 선로로 부하를 이양하기 위해서 구분개폐기를 개방한 후, 연계개폐기를 투입하여, 이양한 부하로 과부하 선로와 1순위 선로의 전체부하를 갱신한다

$$L'_{OL} = L_{OL} - L_r \quad [KW] \quad (2.2)$$

$$L'_{FL} = L_{FL} + L_r \quad [KW] \quad (2.3)$$

여기서 L'_{OL} : 과부하 선로의 갱신된 후의 부하 [KW]

L_{OL} : 과부하 선로의 갱신되기 전의 부하 [KW]

L_r : 이양된 부하 [KW]

L'_{FL} : 1순위 선로의 갱신된 후의 부하 [KW]

I_{n-1} : 1순위 선로의 갱신되기 전의 부하 [KW]
 집합 A에서, $x \in A$ 인 연계개폐기를 다음과 같이 규정한다.
 $I_{\alpha}(x)=1$: 과부하 선로에서 과부하가 해소된 경우 (2.4)
 $=0$: 그 외의 경우
 $I_{\beta}(x)=1$: 1순위 선로에서 과부하를 일으키지 않는 경우(2.5)
 $=0$: 그 외의 경우

그러면 집합 $P_1 - P_4$ 는 다음과 같다.
 $I_{\alpha}(x) = 1$ 이고, $I_{\beta}(x) = 1$ 이면, $x \in P_1$
 $I_{\alpha}(x) = 0$ 이고, $I_{\beta}(x) = 1$ 이면, $x \in P_2$
 $I_{\alpha}(x) = 1$ 이고, $I_{\beta}(x) = 0$ 이면, $x \in P_3$
 $I_{\alpha}(x) = 0$ 이고, $I_{\beta}(x) = 0$ 이면, $x \in P_4$

즉 집합 A의 모든 연계개폐기는 $P_1 - P_4$ 로 분류된다.
 P_1 : 과부하를 해소하고, 1순위선로에 과부하를 일으키지 않음 (적절한 대안)
 P_2 : 과부하를 해소하지 못하고, 1순위선로에 과부하를 일으키지 않음(예비적 대안)
 P_3 : 과부하를 해소하고, 1순위선로에 과부하를 일으킴
 P_4 : 과부하를 해소하지 못하고, 1순위선로에 과부하를 일으킴

3. 지식베이스를 이용한 배전선로의 재구성

배전계통의 재구성 지식베이스는 배전계통의 데이터 베이스, 계통운용 지식베이스, 최적 선로재구성 지식베이스로 구성되어 있으며, 그 자세한 내용은 다음과 같다.

3.1 배전계통의 데이터 베이스
 본 연구에서는 모듈별로 작업 수행시 필요에 따라 기존의 데이터 베이스를 수정하고 데이터 베이스 파일을 생성, 수정하는 동적 데이터 베이스를 구성하였다. 즉, 계통의 상태는 계통의 구성요소와 개폐기의 개/폐 상태에 의해서 결정되므로 계통상태 파악 모듈에 의해 계통상태 데이터를 구성하고, 또한 분기교환에 관련되는 필요한 정보를 미리 선로정보 데이터에 저장함으로써 필요한 정보를 신속·정확하게 얻을 수 있어 최적재구성 시스템의 수행시간 단축과 효율성을 높일 수 있다. 그림1은 구성된 동적 데이터 베이스의 흐름도이다.

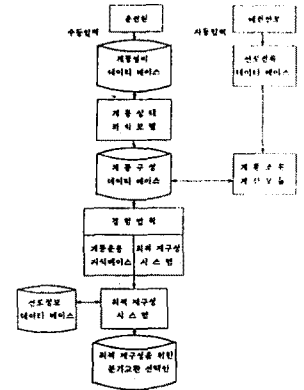


그림1 동적 데이터 베이스의 흐름도
 Fig.1 The flow chart of dynamic data base

3.2 계통운용 지식베이스
 계통운용 지식베이스는 계통상태 파악 규칙베이스, 최적 분기교환 규칙베이스, 개폐기 조작에 따른 선로상태 변화 규칙 베이스, 선로전류에 따른 선로구간 부하추정 규칙베이스, 개폐기 및 최대 전압강하 산정 규칙베이스, 배전선로 손실계산 규칙 베이스로 구성되어 있다.

3.3 최적 선로재구성 지식베이스
 본 연구에서는 평상시 배전선로의 운전상태를 상시 감시 하여 각종 이상상태를 제거하고, 최적재구성을 시행하여 부하를 평형시켜 선로손실 최소화를 이룩하는 최적재구성 지식베이스를 배전계통의 경험적 규칙을 이용하여 구성하였다. 그림2는 배전계통의 효율적인 운영을 위한 최적재구성 지식베이스의 흐름도이며, 이의 수행시간을 단축하기 위해서 사전에 배전계통에 관한 각 데이터 베이스를 구성하여 저장해 두고 이 지식베이스에서 활용했다.

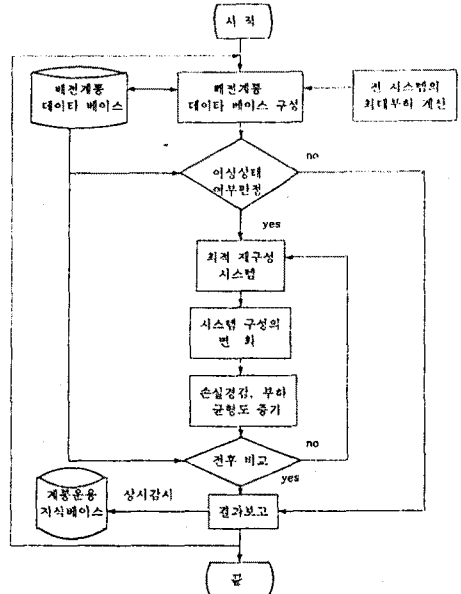


그림2 최적재구성 지식베이스의 흐름도
 Fig.2 Flow chart of optimal reconfiguration system

4. 사례연구

배전계통의 각종 이상상태 발생시 경험적 규칙을 이용한 재구성 지식베이스를 구성하여 이상상태를 제거한 후, 배전선로의 최소 손실화를 위한 분기교환 선택안을 성능 평가하고 이의 타당성을 규정하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여, 이를 분석한 결과는 다음과 같다.

본 논문에서는 배전선로 설계중에 적용할 수 있도록 여러 경로를 통한 연계점에서 분기교환이 가능하고, 다양한 부하 특성과 선로길이를 갖는 도심지역 선로를 대표할 수 있는 모델계통을 구성했으며 그 선로 내용은 다음과 같고, 모델계통도는 그림3과 같다

- 선로전압 : 22.9 KV-Y
- 주 변압기 용량 : 30 MVA * 5개
- 선종 : AL-OC 58 mm², AL-OC 95 mm², AL-OC 160 mm²

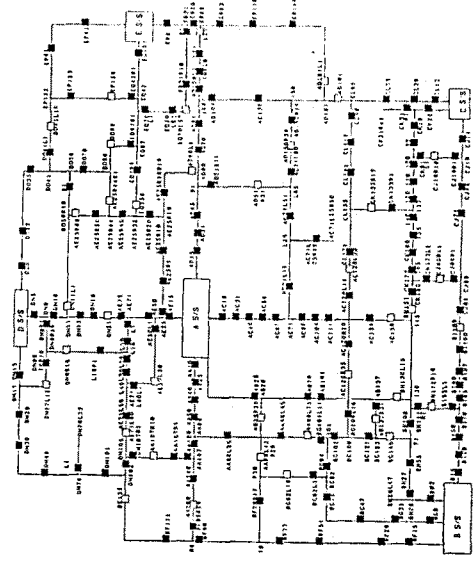


그림3 모델계통도
 Fig.3 Model System

- 대상선로 : 18개 선로, 258개 선로구간
 - 개폐기 : 구분개폐기 112개, 연계개폐기 38개
 여기서 제시된 분기교환 선택안에 의한 최적 선로재구성의 결과를 고찰하기 위해서 배전선로의 과부하, 말단 부분의 저전압, 일부 구간들의 용량초과 제거의 수행과 그 후의 선로손실 및 최대 전압강하를 비교, 검토했다.

다음은 이상상태의 예시와 그 결과 분석이다.
 - 배전선로의 과부하 발생 : E 변전소, EQ D/L
 - 배전선로 말단부분의 저전압 발생 : A 변전소, AC D/L, AC 156
 - 배전선로 일부구간의 용량초과 : C 변전소, CK D/L, CK 20 - CK 31 구간

4.1 배전선로의 과부하 제거

0 최적 분기교환 선택안

E 변전소, EQ D/L의 과부하를 제거하기 위해서 연계개폐기를 식별하면 EP159, EQ70L57, D088, EQ158 이다. 여기서 제한조건을 만족하는 연계개폐기에 의한 선택안은 다음과 같다.

- 1) EQ42R1 개방후 EP159 투입, EQ D/L에서 EP D/L로
- 2) EQ70L1 개방후 EQ70L57 투입, EQ D/L에서 ER D/L로
- 3) EQ97R1 개방후 D088 투입, EQ D/L에서 DO D/L로

여기서 위의 3가지 선택안에 대한 성능평가는 표1에 있다.

0 결과분석

위의 세 선택안을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) E 변전소, EQ D/L의 과부하는 제거됐다.
- 2) 분기교환을 수행한 결과, 분기를 주는 D/L은 선로손실이 감소하는 동시에 전압상태가 개선되고, 분기를 받는 D/L은 선로손실이 증가하는 동시에 전압상태가 악화됐다.
- 2) 세 선택안이 모두 과부하를 제거하나, 최소손실이 되는 2)안이 손실감소 63.9 KW, 전압강하 개선 99.7 V로 최적 분기교환 선택안이다.

표1 배전선로 과부하 제거후 성능평가표
 Table Performance evaluation table
 after reconfiguration

선택안 순위	분기교환	공급선로	선로손실 (KW)	중합손실 (KW)	최대 전압 강하(V)
1	전	EQ D/L	502.2	681.9	551.5
		EP D/L	179.7		417.5
		EQ D/L	427.6		517.3
	후	EP D/L	316.5	744.1	604.5
		EQ D/L	- 74.6	62.2	- 34.2
		EP D/L	136.8		187.0
2	전	EQ D/L	502.2	632.6	551.5
		ER D/L	130.4		324.8
		EQ D/L	312.4		451.8
	후	ER D/L	256.3	568.7	406.2
		EQ D/L	- 189.8	- 63.9	- 99.7
		ER D/L	125.9		81.4
3	전	EQ D/L	502.2	675.2	551.5
		DO D/L	173.0		267.5
		EQ D/L	375.6		472.5
	후	DO D/L	249.7	625.3	331.5
		EQ D/L	- 126.6	- 49.9	- 79.0
		DO D/L	76.7		64.0

4.2 배전선로 말단부분의 저전압 제거

0 최적 분기교환 선택안

A 변전소, AC D/L 말단부분 AC156의 저전압을 제거하기 위해서 연계개폐기를 식별하면 AC156, AC120R35, AC120L30 이다. 여기서 제한조건을 만족하는 연계개폐기에 의한 선택안은 다음과 같다.

- 1) AC111 개방후 AC156 투입, AC D/L에서 BH D/L로
- 2) AC111 개방후 AC120R35 투입, AC D/L에서 BG D/L로
- 3) AC111 개방후 AC120L30 투입, AC D/L에서 CL D/L로

0 결과분석

위의 세 선택안을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) AC D/L, AC156의 저전압은 제거됐다.
- 2) 분기교환을 수행한 결과, 분기를 주는 D/L은 선로손실이 감소하는 동시에 전압상태가 개선되고, 분기를 받는 D/L은 선로손실이 증가하는 동시에 전압상태가 악화됐다.
- 2) 세 선택안이 모두 저전압을 제거하나, 최소손실이 되는 1)안이 손실감소 315.6 KW, 전압강하 개선 346.4 V로 최적 분기교환 선택안이다.

4.3 배전선로 일부구간의 용량초과 제거

0 최적 분기교환 선택안

C 변전소, CK D/L, CK20-CK31 구간 (AL-OC 95mm²)의 용량초과를 제거하기 위해서 연계개폐기를 식별하면 CJ19R18, CK133R17, CJ80R11, BH151 이다. 여기서 제한조건을 만족하는 연계개폐기에 의한 선택안은 다음과 같다.

- 1) CK173L1 개방후 CJ80R11 투입, CK D/L에서 CJ D/L로
- 2) CK180 개방후 BH151 투입, CK D/L에서 BH D/L로

0 결과분석

위의 두 선택안을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 1) CK D/L, CK20-CK31 구간의 용량초과는 제거됐다.
- 2) 분기교환을 수행한 결과, 분기를 주는 D/L은 선로손실이 감소하는 동시에 전압상태가 개선되고 분기를 받는 D/L은 선로손실이 증가하는 동시에 전압상태가 악화됐다.
- 3) 두 선택안이 모두 용량초과를 제거하나 최소손실이 되는 1)안이 손실감소 47.2 KW, 전압강하 개선 90.0 V로 최적 분기교환 선택안이다.

5. 결 론

최적 선로재구성은 정상운전 조건 하에서 전문가의 경험을 적용한 선로재구성 지식베이스를 구성하여 개폐기 조작을 통한 분기교환을 수행함으로써 배전선로의 과부하, 배전선로 말단부분의 저전압, 일부구간의 용량초과 발생 등의 각종 이상상태를 제거하고, 최적 분기교환 방안의 채택으로 배전계통 최적운영을 위한 선로손실 최소화를 이룩했으며, 배전선로 부하의 합리적인 배분으로 시스템의 신뢰도를 향상시킨다.

이 선로재구성의 효율적인 수행을 위해서 배전계통의 우선순위에 따라 경험적 규칙을 적용한 최적 우선 탐색법은 다양한 분기교환 선택안을 평가하는데 사용되고, 최적 선로재구성을 모델시스템에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 수행한 결과는 다음과 같다.

- 1) 최적의 분기교환 방법의 채택으로 전압상태를 개선하고, 배전선로의 최소손실화를 이룩하였다.
- 2) 배전계통은 경험적 규칙을 적용하여 지식베이스를 구성하고, 배전계통의 실제 운영에 효율적으로 적용할 수 있는 최적 선로재구성을 제시했다.
- 3) 배전선로의 과부하, 말단부분의 저전압, 일부구간의 용량초과 등의 이상상태 제거로 배전선로의 돌발적인 고장을 예방할 수 있었다.
- 4) 숙련된 전문가의 지식을 활용하여 최적으로 재구성된 배전계통을 확립했다.

또한 이 결과를 활용함으로써 배전선로를 직접 운영하고 있는 전력회사의 입장에서는 손실감소로 인한 전력 생산원가의 절감, 신뢰도 증가로 인한 대 고객 봉사수준의 향상 등의 이익을 얻을 수 있다

6. 참고문헌

- [1] C.C.Liu, S.J.Lee, K.Vu, "Loss Minimization of Distribution Feeders Optimality and Algorithms", Presented at IEEE/PES 1988 Summer Meeting, Portland, Oregon, Jul. 1988, 88 SM 580-3.
- [2] S.Civanlar, J.Grainger, H.Yin, S.S.H.Lee, "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp.1217-1233, Jul. 1988.
- [3] T.Taylor, D.Lubkeman, "Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.5, No.1, pp.239-246, Jan. 1990.
- [4] Y.Y.Hsu, H.M.Huang, S.K.Peng, C.W.Chang, K.J.Chang, H.S.Yu, C.E.Chow, R.T.Kuo, "Distribution System Service Restoration using a Heuristic Search Approach", Presented at IEEE/PES 1991 Summer Meeting, Dallas, Texas Sep. 1991.
- [5] 조 시형, 최 병윤, 우 광방, "경험적 규칙을 이용한 배전계통의 재구성 기법", 대한전기학회 학회 학술대회, 1991.7
- [6] 김세호, 류현수, 최병윤, 조 시형, 문영현, "트리구조의 배전계통 데이터베이스 구성과 트리탐색 기법", 대한전기학회 학회 학술대회, 1992.7