

배전계통 최적기본신뢰도 지수 평가를 위한 유전자 알고리즘의 적용

*김재철, *한성호^o, *이보호, **이 옥, *** 장정태
*송실대학교 전기공학과, ** 대진대학교 전기공학과, *** 한국전력연구원

Assessment of the optimal basic reliability in distribution system using genetic algorithm

* Jae-Chul Kim, *Seong-Ho Han^o, *Bo-Ho Lee., ** Wook Rhee, ***Jeong-Tae Jang
* SoongSil University, ** DaeJin University, *** KEPCO Rsearch Center

Abstract

This paper presents a new approach to evaluate optimal basic reliability indices of electric distribution systems using genetic algorithm. The use of optimal reliability evaluation is an important aspect of distribution system planning and operation to determine adequacy reliability level of each area. In this paper, the reliability model is based on the analytical method, connecting component failure to load point outage in each section. The proposed method applies genetic algorithm to calculate the optimal values of basic reliability indices, ie. failure rate and repair time, for a load point in the power distribution system, subject to minimizing interruption cost. Test results for the model system are reported in the paper compared with a direct optimization method (gradient projection).

1. 서론

최근 전력계통 신뢰도 평가에 대한 각종 전력회사들의 관심은 공급자 측면에서의 무정전 공급이 아니라 말단 부하인 수용가 관점에서 그들이 실제로 경험하게 되는 정전횟수 및 시간을 감소시키는 서비스 차원의 관리개념으로 전환되고 있다. 더우기 각종 전력회사에서 조사한 통계자료들은 수용가측에서 경험하는 계통사고 중 배전측의 사고가 가장 큰 비중을 차지하고 있다는 사실을 제시하고 있다. 따라서 점점 높아져 가고 있는 수용가의 욕구를 충족시켜 주면서 보다 신뢰성 있는 전력을 공급하기 위해서는 이 분야에 대한 보다 활발한 연구가 절실한 실정이다.

지금까지 발표된 대부분의 신뢰도 평가법은 평균적 신뢰도 수준 파악을 중심으로 연구되었으나 최근의 연구동향은 최적신뢰도 지수(optimal reliability index)를 설정하고 예측하여 효율적인 설비투자 계획 및 운영을 확립하는 방향으로 진행되고 있다. 즉 개별적인 수용가 측면에서 더욱 상세한 신뢰도 목표치 관리를 하기 위하여 지역적 특성과 수용가의 욕구를 만족시키는 것이다. 국내의 경우는 아직도 각 지역의 정전사고 실적을 수집하여 평균치를 산출하는 수준에 머무르고 있다.

배전계통에 있어서 최적신뢰도 문제는 정전비용(outage cost)과 투자비용(investment cost)의 최소 균형점(minimal equilibrium)을 찾는 것을 말한다. 즉 이 문제는 신뢰도의 개선이 사고정전비용의 감소를 가져올 수는 있으나 역으로 투자비용의 증가를 초래하게 되므로 투자비용을 고려한 사고정전비용의 최소화 문제를 의미한다. 따라서 현재 운용계통(operation system)을 대상으로 부하지점(load point)의 기본신뢰도 지수(basic reliability index) 즉, 사고율과 복구시간을 산출하고 유지보수공사 및 배전 자동화 등에 따른 투자비용을 상정해 최적기본 신뢰도 지수를 산출한다. 이는 기존계통에 대한 최적의 운용계통을 결정하는데 유용하게 사용될 수 있으며 각 대안을 비교함으로써 최적계통을 결정할 수 있다. 이를 위한 연구로서 1990년에 Abdelhay A. Sallam이 최대경사투영법(gradient projection method)을 이용하여 정전비용을 목적함수로 최적화를 실시하였다.[1] 그러나 이 접근법은 초기값이 최적해에 충분히 가까운 때만 수렴하며 또한 단지 지역적 수렴만을 보장할 수 있다는 단점을 갖고 있다. 따라서 본 논문에서는 보다 최적의 해를 알기위해 유전자 알고리즘을 이용하여 단점을 보완하였다. 또한 유전자 모델 중 첫 번째 세대에서 가장 우수한 유전인자의 특성을 다음 세대 해의 집단에 포함시

켜 수렴속도의 증가 및 방향을 유지시켜 조기수렴 현상을 막아주는 엘리트리스트 모델(elitist model)을 사용하였다.[3,4]

2. 최적 공급신뢰도 지수 평가개념

현재 운영중인 선로의 구조적 연결은 변화시키지 않고 임의의 부하지점과 연관되어지는 각 구성요소들의 사고율과 복구시간 즉 기본 신뢰도 지수를 토대로 정전비용을 최소화 시키는 것을 기본 신뢰도 지수 최소화 문제라 한다.

다음 그림 1은 공급전원측으로부터 부하지점 q까지 전력을 공급할 수 있는 가능한 모든 경로인 n개의 선로 T_1, \dots, T_n 을 보여준다.[1]

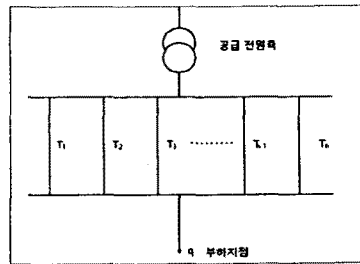


그림 1 n개의 선로를 통해 공급받는 부하지점q

최적신뢰도 지수는 임의의 부하지점 q에 대하여 정전비용을 최소화시키는 것을 목적으로 선로의 최적기본신뢰도 지수 λ^* , r^* 을 구하는 것이다. 이때 상태변수는 부하지점의 신뢰도 지수들이다.

$$\lambda_q = f_1(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (1)$$

$$r_q = f_2(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, r_1, r_2, \dots, r_n) \quad (2)$$

여기서, λ_i : i 선로의 사고율

r_i : i 선로의 복구(정전)시간

f_1, f_2 : λ, r 의 스칼라 함수

각 상태는 부하지점에 전력을 공급하는 각 선로의 사고율 함수와 정전시간의 함수로서 계산된다.

최적 기본신뢰도 지수 산출을 위한 목적함수는 식(3)과 같이 정전비용이 된다. 전체 정전비용 y는 초기 정전비용함수 y_1 , 사고율과 부하율에 비례하여 증가하는 함수 y_2 , 정전에 기인한 비용함수 y_3 , 계산에 의해 변환되는 최적 신뢰도 지수값에 따른 비용함수 y_4 의 전체 함으로 나타낸다. 또한 상태변수들은 다음 식(4), 식(5)와 같은 제약조건을 만족해야한다. 여기서, C_1 은 사고율의 최대한계값으로 제약상수(constraint constant)를 나타낸다. 또한 C_2 는 복구시간의 최대 한계값을 의미한다.

$$\text{Min } y = y_1 + y_2 + y_3 + y_4 \quad (3)$$

$$s.t. \quad 0 < \lambda_i \leq C_1 \quad (4)$$

$$0 < r_i \leq C_2 \quad (5)$$

$$y_1 = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot \lambda_i \cdot r_i}{8760} \quad (6)$$

$$y_2 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot KVA_q \cdot \lambda_i \cdot k \quad (7)$$

$$y_3 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot KVA_q \cdot \lambda_i \cdot r_i \cdot h_1 \quad (8)$$

$$y_4 = \sum_{i=1}^n C \cdot \Delta \lambda_i \quad (9)$$

이거시, A_i : T_i 선로의 년간 초기비용
 a_i : T_i 의 부하율
 KVA_q : 부하지점 q의 전체 부하량
 k : KVA당 가격
 h_1 : 정전비용 [원/KVA.hour]
 C : 사고당위당 비용
 $\Delta \lambda_i$: T_i 선로의 사고율 개선치

3. 최적신뢰도 지수를 위한 유전자 알고리즘의 적용

본 논문에서 제안된 배전계통 공급신뢰도 지수의 최적화를 위한 유전자 알고리즘의 적용방안은 계통의 정상상태에 대한 최적 기본 신뢰도 지수의 산출이다. 제안한 최적 신뢰도 지수 평가방안의 전체적인 수행절차는 그림 2와 같다. 먼저, 해석하고자 하는 시스템을 선정하고 실측도면을 기초로 디지털화하여 해석계통의 도면화인 데이터베이스를 구축한다. 다음으로 해석을 위한 가정조건 즉, 사고구간의 독립성, 부하제한계, 계통의 운전조건 등을 선정하고 구성요소를 결정하여 신뢰도 모델을 구성한다.

다음 단계로 조사된 사고통계분석을 바탕으로 각각의 구성 요소에 대한 사고율(λ), 복구시간(r)을 산정하여 신뢰도 데이터를 구축한다. 구축된 신뢰도 데이터와 데이터베이스의 계통 정보데이터를 토대로 유전자 알고리즘을 적용하여 최적 기본 신뢰도 지수를 산출한다. 마지막으로 시스템 신뢰도 지수를 산출하여 결과를 출력한다.

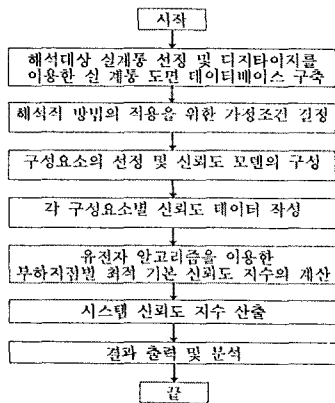


그림 2 제안된 최적 신뢰도 평가방법의 순서도

3-1 스트링 구조

본 논문에서 제안한 최적신뢰도 지수 평가방안은 최적 기본 신뢰도 지수와 최적 시스템 신뢰도 지수로 나누어 수행되므로 스트링 구조도 두가지 방안을 제시하였다. 먼저 최적 신뢰도 지수 즉 임의의 부하지점을 공급하는 선로에 관련된 모든 구성요소들의 사고율 $\lambda No(i)$ 과 복구시간 $r No(i)$ 을 스트링으로 구조화 하였다. 코딩은 각 선로의 사고율과 복구시간을 인자로 2진 코드, 20bits로 처리하였다. 이에 대한 내용을 그림 3에 나타내었다.

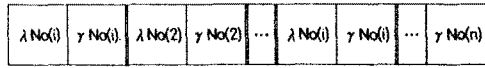


그림 3 최적기본신뢰도 지수를 위한 스트링 구조

3-2 적합도 함수

먼저 최적 기본 신뢰도 지수를 위한 적합도 함수(fitness function)의 정의는 식(3)의 목적함수를 토대로 정전비용(interruption cost)함수 y 를 대상으로 하였다. 적합도 평가함수는 정전비용의 최소화 문제를 큰 상수값 100을 첨가하여 항상 양(positive)의 값을 갖도록 식(10)과 같이 최대값 문제로 변환하였다.

$$Max y = 100 - (y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \quad (10)$$

3-3 유전자들의 조작

일반적으로 부호화는 유전자 집단의 크기와 탐색 공간의 크기 그리고 상대값의 해상도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 탐색공간이 작을수록 작은 유전자 집단을 가지고 해를 빨리 찾을 수 있고, 유전자의 비트수에 따라 구하고자 하는 해의 정밀도가 결정된다. 유전자 집단은 유전연산자에 사용될 유전인자들을 포함하고 있어 집단의 크기가 큰 경우 유전연산자의 효과를 충분히 나타낼 수 있다. 그러나 유전자 집단을 크게 할 수 없기 때문에 문제의 복잡도나 탐색공간의 크기에 따라 보통 30에서 200정도로 선정한다. 본 논문에서 적용한 유전자 알고리즘의 제어 파라미터의 선정은 다음과 같다. 해의 집단크기는 200으로 선정하였으며 최대세대 수는 1000으로 정하여 검토하였다. 스트링 구조는 이전수 부호화로서 제한된 범위로 매핑하였다. 또한 본 시뮬레이션의 타당성을 입증하고자 서로 다른 해의 집단을 동시에 40개를 생성하여 최대 세대수 까지 나란히 진화시키면서 이들의 평균값을 분석할 수 있도록 프로그램하였다.

적합도의 스케일링은 평균적합도에 대한 최대 적합도의 비율로 적합도의 분포를 선형 스케일링하여 재생산시 선택되는 개수를 조정하였다. 유전자 집단의 크기가 작기 때문에 발생하는 조기 포화 현상을 손실된 인자의 개수에 따라 돌연변이 비트의 개수를 선정하여 돌연변이 연산을 실시하였다. 또한 최대 적합도를 가진 유전자가 재생산 과정에서 확률적으로 선택되고 교차연산이나 돌연변이 연산에 의해 변화하기 때문에 다음 세대에 나타나지 않는 경우가 발생한다. 이러한 결점을 보완하기 위해 최대 적합도를 가진 유전자를 다음세대에 복제하는 엘리트스트 모델을 사용한다.

4. 사례연구

유전자 알고리즘을 이용한 부하지점별 최적기본신뢰도 지수의 평가사에는 문헌[11]이 제시한 모델계통을 대상으로 하였다. 사례연구를 위한 부하지점별로 모델계통의 부하지점 24번을 선정하였으며 샘플계통의 신뢰도 모델구성도는 그림 4와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 부하지점 24는 두 개의 전원측 1, 2로부터 전력을 공급받는다. 또한 각 구간들은 직렬, 병렬의 구조로 서로 연결되어 있으며 부하지점 24가 전원측으로 부터 전력을 공급받는 경우는 모두 4가지 경우가 있다. 즉 첫번째 경로는 1→5→7→9→16→21→23의 수순으로, 두 번째 경로는 1→3→27→42→44→54→25, 세 번째 경로는 2→4→5→7→9→16→21→23, 네 번째 경로는 2→3→27→42→44→54→25의 수순으로 이어진다.

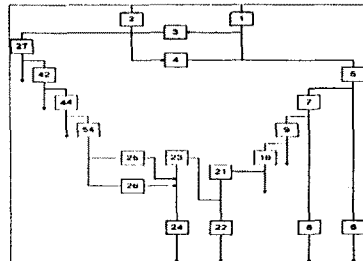


그림 4 샘플계통의 신뢰도 모델도

평가결과에 대한 타당성을 검증하고자 최대경사투영법을 이용하여 얻은 최적화 결과와 유전자 알고리즘을 이용하여 얻은 최적화 결과를 비교 검토하였다. 따라서 이를 위한 모델계통의 각 구성요소 선정과 이들의 신뢰도 데이터를 토대로 구간별 사고율과 복구시간 데이터를 작성하면 표 1과 같다.

표 1 모델계통의 구간별 사고율과 복구시간 데이터

구간	사고율 λ	복구시간 γ	구간	사고율 λ	복구시간 γ
1	0.02343	0.1066	21	0.05146	8.0449
2	0.02343	0.1066	22	0.0101	2.9089
3	0.0228	10.2692	23	0.05146	8.0449
4	0.0228	10.2692	24	0.0101	2.9089
5	0.1229	3.8929	25	0.109578	4.3680
6	0.0101	2.9089	26	0.10598	4.3680
7	0.0546	7.6092	27	0.08123	5.2047
8	0.0101	2.9089	42	0.0707	6.0186
9	0.0674	6.2701	44	0.08999	4.9314
16	0.0739	5.6675	54	0.0482	8.5616

표 1을 토대로 부하지점 24에 전력을 공급하는 선로에 연관되는 구간들의 사고율과 복구시간을 합하면 표 2와 같이 각 연계선로별 기본신뢰도 지수를 계산할 수 있다. 또한 표 2의 결과를 통해 사고율과 복구시간의 최소값과 최대값을 각각 선정하여 스트링의 경계를 설정하면서 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 결과를 얻었다. 표 3은 각 공급선로의 부하 부담율을 25%로 균등부하로 가정할 경우에 대한 최적화 결과이며 표 4는 불균등부하의 경우로서 공급선로 T_1, T_2, T_3, T_4 의 부하부담율이 각각 10%, 20%, 30%, 40%로 가정한 결과이다. 여기서 목적함수에 필요한 각종 상수값은 정확한 비교판단을 문헌[1]과 똑같은 상황으로 설정하고 사례연구하였다.

표 2 모델계통(부하지점 24)의 전력 공급선로별 기본신뢰도 지수 평가결과

공급선로	경로에 따른 구간번호	λ	γ	$U(\lambda \times \gamma)$
T_1	1,5,7,9,16,21,23,24	0.45536	6.11206	2.783187
T_2	2,4,5,7,9,16,21,23,24	0.47815	6.3104	3.01737
T_3	2,27,42,44,54,25,24	0.42954	5.5512	2.38638
T_4	1,3,27,42,44,54,25,24	0.45234	5.7938	2.62076

표 3 균등부하일 경우 최적신뢰도 지수결과(부하지점#24)

공급선로	최적사고율 λ^*		최적복구시간 γ^*		최소정전비용*		초기정전 비용 F_0
	문헌[1]	본논문	문헌[1]	본논문	문헌[1]	본논문	
T_1	0.19037	0.10374	6.49039	6.23798	29.5818	23.4937	40.65366
T_2	0.18877	0.10538	6.49230	6.38681	29.5818	23.4937	40.65366
T_3	0.21043	0.10436	6.49021	5.72619	29.5818	23.4937	40.65366
T_4	0.20052	0.10314	6.48860	5.89753	29.5818	23.4937	40.65366

표 4 불균등부하일 경우 최적신뢰도 지수결과(부하지점#24)

공급선로	최적사고율 λ^*		최적복구시간 γ^*		최소정전비용*		초기정전 비용 F_0
	문헌[1]	본논문	문헌[1]	본논문	문헌[1]	본논문	
T_1	0.06019	0.11372	6.29134	6.27741	25.2333	23.3607	41.4049
T_2	0.23192	0.10745	6.49509	6.40776	25.2333	23.3607	41.4049
T_3	0.14352	0.10345	6.48570	5.64704	25.2333	23.3607	41.4049
T_4	0.09871	0.10163	6.49990	5.87471	25.2333	23.3607	41.4049

표 3의 경우 문헌[1]의 결과와 본 논문에서 제시한 방법으로 얻은 최적화결과를 비교해 볼 때 전자의 경우 최적화를 시행한 후 비용의 이득이 11.07 인데 반해 유전자 알고리즘을 이용하여 얻은 비용이득이 17.16의 효과를 얻을 수 있다. 또한 표 4의 경우는 문헌[1]의 경우 16.17의 이득을 본 논문의 경우 18.04의 훨씬 향상된 이득을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 5, 6, 7은 유전자 알고리즘의 수행후 얻은 결과를 그림으로 분석한 것으로 세대수의 증가에 따른 평균적용도, 최소적용도,

최대적용도를 각각 나타낸다. 여기서 적용도는 40번을 반복수행하여 평균값을 산출하여 나타내었다.

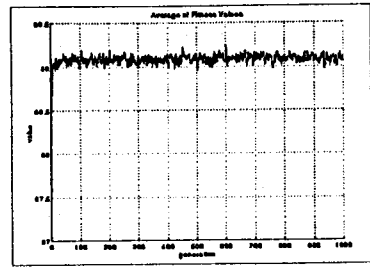


그림 5 최적기본 신뢰도지수의 평균적용도 특성

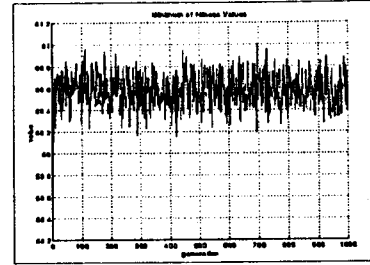


그림 6 최적기본 신뢰도지수의 최소적용도 특성

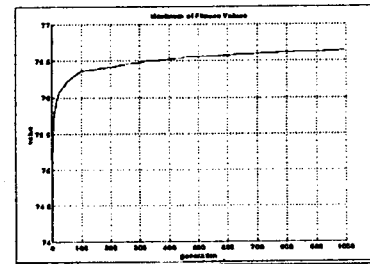


그림 7 최적기본 신뢰도지수의 최대적용도 특성

5. 결론

본 논문은 배전계통의 계획 및 운용을 위하여 공급신뢰도측면에서 검토한 것으로 최적기본 신뢰도지수의 산출문제를 유전자 알고리즘을 이용하여 해석하였다. 따라서 기존의 최대경사투영법이 안고 있는 국소해 수렴문제를 극복하고 전역해의 탐색이 가능하도록 프로그래밍하였다. 따라서 배전계통의 최적운용안을 선정하는데 유용하게 활용할 수 있으며 최적 신뢰도 목표치를 파악함으로써 투자효율의 향상을 도모할 수 있다. 그러나 앞으로 보다 많은 실제계통 사례연구를 통해 제안된 알고리즘의 효용성을 보완하고자 한다.

6. 참고문헌

- [1] Abdelhay A. Sallam, Mohamed Desouky, Hussien Desouky, "Evaluation of optimal reliability indices for electrical distribution systems," *IEEE Trans on Reliability*, Vol. 39, No. 3, pp259-264, August 1990.
- [2] G.KjØlle, K.Sand, "RELRAD - Analytical Approach for Distribution System Reliability Assessment," *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 7, No.2, pp809-814, April 1990.
- [3] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization & machine learning*, Addison Wesley, 1989.
- [4] D. E. Fogel, "Introduction to simulated evolutionary optimization," *IEEE Trans, on Neural Networks*, Vol. 5, No. 1, pp3-14, 1994.
- [5] 김 재철, 한 성호, "배전계통의 해석적 공급신뢰도 평가 프로그램 개발," 한국조명설비학회 Vol.9. No. 7. Oct.1995.