

전력계통의 지역간 예비율 산정에 관한 연구

남궁 재용[Ⓞ] 이 병준^{*} 송 길영^{*} 최재석^{**}

* : 고려대학교 전기공학과 ** : 경상대학교 전기공학과

A Study on the Evaluation of Area Reserve Margin in Composite Power Systems

Jaeyong, Namkung[Ⓞ] Byongjun, Lee^{*} Kilyeong, Song^{*} Jaeseok, Choi^{**}

* : Korea University ** : Gyeongsang National University

Abstract - When reliability is estimated to be insufficient, a planner must take action to improve them. So, the measures for improving reliability are mainly considered in the planning process. In order to provide quantitative information concerning reliability evaluation, this paper describes an algorithm to find reserve margin in power system planning. The IEEE Reliability Test System(RTS) is used to demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm.

1. 서 론

전력계통은 지역적으로 분포되어 있기 때문에 전력계통에서 일어나는 문제는 공간적인 차원을 포함하게 된다. 따라서 지역에 따라 송전계통에서의 공급예비율의 편차가 생길 것이며 이 예비율의 편차를 밝힐 수 있다면 계통계획면에서나 계통운영면에서 보다 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다⁽¹⁾.

전원과 송전망을 합친 복합계통의 신뢰도와 관련된 논문으로는 79년 L. L. Garver 등이 복합계통에서의 최대전력수송량(Load Supplying Capability : LSC)을 구하는 내용을 처음으로 발표하였는데⁽²⁾, 이 논문에서는 단지 주어진 계통의 최대전력수송량을 구하는 내용만을 다루었지 '구체적으로 어느 지역이 취약한가' 등의 진일보한 내용까지는 다루지 않았다. 90년대에 들어서는 J. Toyoda 등에 의하여 복합계통의 최소예비율(minimal reserve margin)에 관한 지수가 소개되었다⁽³⁾⁽⁴⁾. 그러나, 이 방법에서는 선로에 흐르는 전력이나 각 모선의 유효전력을 조류계산법과 같은 계통방정식을 통하여 구하는 것이 아니라 단지 발전기나 선로용량의 상·하한 제약 하에서만 계산하였기 때문에 정확한 조류계산의 결과와는 일치하지 않는 문제점이 남아 있다.

본 연구에서 제안하는 복합계통에서의 공급예비율

평가법의 기본적인 방침은 최대전력수송량(LSC)을 이용해서⁽⁵⁾ 각 부하모선에 공급지장이 생길 때까지의 여유(각 부하모선의 예비율)와 그 지역분포를 구함으로써 지역적인 신뢰도분포, 나아가 지역적인 신뢰도편차의 원인이 되는 병목선로를 찾는 데 중점을 두고 있다. 그 결과 '구체적으로 어느 지역이 취약한가, 지역적 신뢰도차이의 원인이 되는 병목선로는 어느 선로인가' 등에 관한 자료를 얻을 수 있다.

2. 최대전력수송량(LSC)의 계산 및 그 평가

최대전력수송량(LSC)은 전원 및 송전선로의 상·하한제약하에서 직류조류법으로 모델링한 전력조류계산식을 만족시키면서 전원과 송전망으로 구성된 복합계통이 얼마나 많은 전력을 계통의 부하에 공급할 수 있는가를 나타내는 양으로서, 식 (1)과 같이 정식화될 수 있다.

$$\text{목적함수 : LSC} = \text{Max} \sum_{k=1}^{N_G} G_k \quad (1)$$

제약조건 :

$$\text{㉠ 회로방정식} \quad : \mathbf{Y} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{G} - \mathbf{L}, \mathbf{f} = \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}$$

$$\text{㉡ 수급밸런스} \quad : \sum_{k=1}^{N_G} G_k = \sum_{i=1}^{N_L} L_i$$

$$\text{㉢ 부하의 배분비율} \quad : L_i = \beta_i \sum_{k=1}^{N_G} G_k$$

$$\text{㉣ 선로조류제약} \quad : \mathbf{f}^{\min} \leq \mathbf{f} \leq \mathbf{f}^{\max}$$

$$\text{㉤ 발전기출력제약} \quad : \mathbf{G}^{\min} \leq \mathbf{G} \leq \mathbf{G}^{\max}$$

$$\text{㉦ 전압위상각} \quad : \boldsymbol{\theta}^{\min} \leq \boldsymbol{\theta}$$

단, G_k : 발전기 출력벡터 L_i : i 모선의 부하
 \mathbf{Y} : 어드미턴스행렬 N_G : 발전기모선의 총 수
 $\boldsymbol{\theta}$: 전압위상각벡터 N_L : 부하모선의 총 수
 \mathbf{f} : 선로조류벡터 β_i : 부하비율
 \mathbf{A} : node/link 접속행렬

3. 수요단 예비율에 따른 지역분할

최대전력수송량은 여러 가지 제약조건하에서 전발전력 최대화라는 최적화 알고리즘에 따라 산정된다. 이 결과 최대전력수송량은 계통 내의 취약한 일부 송전선로나 발전기의 송전용량 및 출력제약에 구속된 상태에서 구해진다. 한편, 각 부하모선에서의 부하는 이 최대전력수송량(= $\sum G_k$)의 일정배 분비율로 설정되고 있기 때문에 각 모선의 부하에 따라서는 더 늘릴 수 있지만 결국 계통 내의 일부 요소의 제약상(곧, 병목설비의 존재) 더 늘릴 수 없는 수준에서 멈추게 된다. 즉, 최대전력수송량의 계산과정에서 각 부하모선의 부하는 전계통에서 일정비율을 갖도록 계산된 것이므로, 지역(모선)에 따라서는 이처럼 정해진 비율 이상의 부하를 담당할 수 있는 여유 있는 지역(모선)과 전혀 여유가 없는 지역(모선)으로 나누어 질 것이다.

본 연구에서는 식 (2)와 같이 수요단 예비율 R_k 를 정의하고 이 예비율 R_k 를 기초로 해서 지역간 분할을 실시하였다. 예비율에 따른 지역분할의 과정을 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

단계 1 : LSC의 계산

식 (1)을 이용, 주어진 운전조건하에서의 LSC를 계산한다.

단계 2 : 수요단 예비율 R_k 의 계산

식 (2)를 이용하여 수요단 예비율을 계산한다. 이 경우 처음 얻어진 $R_k^{(0)}$ 는 초기의 수요단 예비율로서 지역분할 개시 전의 예비율을 나타낸다. 이후 반복계산에 따라 얻어지는 $R_k^{(1)}, R_k^{(2)}, \dots$ 는 예비율 수준에 따라 지역분할이 실시되면서 그 때마다 향상된 예비율 값을 나타내게 된다. 한편, 식 (2)에서의 고정치란 반복계산과정 중 단계 4에서 공급지장모선으로 판단되어 그 부하값을 계산시점의 예비율을 갖는 부하값으로 고정시키는 모든 부하모선의 누적된 부하값의 합이다.

$$R_k = \frac{(LSC - \text{고정치}) - (\text{부하의 총수요} - \text{고정치})}{(\text{부하의 총수요} - \text{고정치})} \times 100 [\%] \quad (2)$$

단계 3 : 예비율 R_k 에 따른 지역분할

각 부하모선별로 돌아가면서 부하를 근소량 증가(이때의 증가분은 나머지 부하모선에서 균등하게 나누어서 빼어줌)시킨 새로운 부하상태를 상정해서 LSC를 계산한다. 그리고, 계산된 결과(부하)와 원래의 부하값을 비교했을 때 부하를 증가시킨 특정 모선을 제외한 나머지 모선에서의 부하가 모두 감소한다면, 특정모선의 부하증가에 대응해서 다른 모선에 공급되는 전력의 양이 감소됨을 의미하므로 계통내 일부요소의 제약(곧 병목설비)에 의한 공급

지장모선으로 판정한다. 그 이외의 비교결과는 LSC를 증가시키고 있는 경우로서 특정모선에 대해 아직도 공급여력이 남아 있는 것으로 판정한다.

단계 4 : 공급지장모선의 예비율 고정

단계 3의 계산에서 공급지장모선이 포함된 지역은 예비율 $R_k(\%)$ 의 신뢰도지역이므로 이 지역에서는 더 이상의 부하를 분담할 수 없기 때문에 이 지역의 부하를 예비율의 부하값으로 고정시킨 후 단계 1로 돌아간다.

단계 5 : 지역분할의 종료

단계 1 ~ 단계 4의 조작을 반복하는 과정 중 단계 3에서 모든 부하모선이 공급지장모선으로 판정되면 더 이상 진행할 수 없으므로 지역분할은 종료된다.

4. 사례연구

본 연구에서 제시한 알고리즘을 IEEE 신뢰도 시험계통에 적용하였다. 주어진 모델계통의 전원용량은 3405[MW]이며 예측된 최대부하는 2850[MW]이다. 그리고, 송전선로의 용량제한 등의 이유로 계통이 설비용량의 전력을 공급하지 못하는 경우를 살펴보기 위하여 각 선로의 정격용량을 반으로 줄이고 계산하였다.

4.1 초기 수요단 예비율 및 공급지장모선

주어진 모델계통에 대해 계산된 LSC 값은 2934.191[MW]로서 모든 부하모선이 예측된 최대부하에 대해 최소 약 3%의 예비율을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 각 부하모선에서의 부하를 차례로 근소량(여기서는 1%로 계산)씩 증가시켜서 LSC를 구한 결과는 표 1과 같다.

표 1 공급지장모선의 결정

1%씩 증가시킨 부하모선	LSC [MW]	다른 부하모선의 변화 (원래의 부하값과 비교한 결과)	최종판정 (예비율)
①	2931.837	감소	3% 고정
②	2931.650	감소	3% 고정
③	2934.267	감소	3% 고정
④	2933.490	감소	3% 고정
⑤	2933.968	감소	3% 고정
⑥	2918.738	감소	3% 고정
⑦	2935.478	일치	-
⑧	2935.952	일치	-
⑨	2934.930	감소	3% 고정
⑩	2937.384	증가	-
⑪	2936.699	감소	3% 고정
⑫	2935.129	감소	3% 고정
⑬	2937.305	감소	3% 고정
⑭	2935.272	증가	-
⑮	2937.620	일치	-
⑯	2936.107	증가	-
⑰	2935.522	증가	-

4.2 반복계산의 결과

표 1의 결과에 의하여 ①, ②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑨, ⑬, ⑭, ⑮번 모선의 경우는 예비율 3(%)의 부하값으로 고정시키고 다른 모선은 같은 비율의 변수로 두고 두 번째 반복에서의 LSC를 계산하기 위한 자료를 구한다. 이렇게 두 번째 반복한 계산부터 최종결과까지를 표 2에 나타내었다.

표 2 두 번째 이후의 반복계산에서의 결과

반복회수	LSC [MW]	예비율 [%]	특정모선의 부하를 증가시켰을 때 다른 모선의 부하값이 감소한 경우
2	3104.6	17	⑧, ⑩
3	3197.2	28	⑬, ⑳
4	3299.5	36	⑮
5	3352.0	70	⑦
6	3405.0	162	

계산된 결과를 정리하면 다음 그림 1과 같다.

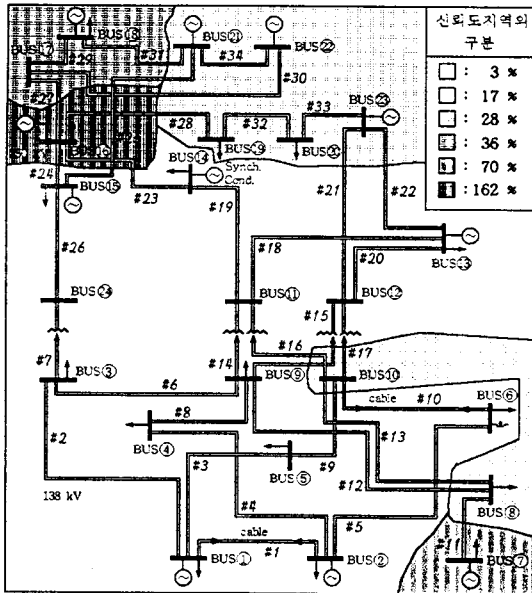


그림 1 IEEE 신뢰도계통의 지역간 예비율 산정

이때 각 반복계산에서의 병목선로를 나타내면 표 3과 같다.

표 3에서는 총 34개의 선로 중 5개의 선로만이 병목이 되었는데, 이 병목선로들은 모두 예비율에 따른 지역분할에서의 경계선에 해당되었다. 저예비율지역으로의 전원공급을 제한하는 요소가 바로 이러한 병목선로들이므로, 저예비율지역의 신뢰도향상대책을 세운다면 바로 이러한 병목선로들이 대상

이 될 것이다.

표 3 각 반복계산에서의 병목선로

반복회수	LSC[MW]	병목선로
1	2934.191	#10, #17, #23
2	3104.619	#11, #17, #23
3	3197.190	#11, #23, #27
4	3299.499	#11, #23
5	3351.966	#23
6	3405.000	#11, #23

5. 결론

1. 본 연구를 통하여 각 부하모선의 공급지장이 생길 때까지의 여유(각 부하모선의 예비율)와 그 지역분포를 구할 수 있었다. 그 결과 '구체적으로 어느 지역이 취약한가' 등에 관한 자료를 구할 수 있었다.
2. 계통에서의 각 부하모선의 수요에 의해 정해지는 지역적인 신뢰도분포를 계산하는 과정에서 '지역적 신뢰도차이의 원인이 되는 병목선로'를 찾을 수 있었다. 총 34개의 선로 중 5개의 선로만이 병목이 되었는데, 이 병목선로들은 모두 예비율에 따른 지역분할에서의 경계선에 해당되었다.

(참고 문헌)

- [1] 송길영, "전력계통의 해석 및 응용", 동일출판사, 1993.
- [2] L. L. Garver, P. R. Van Horne, K. A. Wirgau, "Load Supplying Capability of Generation - Transmission Networks", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-98, No. 3 May/June, pp. 957-962, 1979.
- [3] L. N. Chen, H. Suwa, J. Toyoda, "Power Arrival Evaluation of Bulk System Including Network Constraints Based on Linear Programming Approach", IEEE Trans. Power System, Vol. 6, NO. 1, 1991.
- [4] J. Toyoda, L. N. Chen, T. Minakawa & T. Yamada, "New Indices and Computational Techniques for Composite Systems Reliability Evaluation", The Paper of CIGRE Reliability Symposium, 1A-01, 1991.
- [5] 송길영, 남궁재용, 김용하, "장기계통계획을 위한 수송력평가", 대한전기학회 논문지, 제 46권, 제 4호, pp. 468-474, 1997.4