

송전계통에서의 공급능력여유의 평가에 관한 연구

송 길영* 남궁 재용⁽¹⁾ 최 재석** 김 용하***

* : 고려대학교 ** : 경상대학교 *** : 인천대학교

A Study for Load Supplying Margin of Transmission Networks

Kil-Yeong, Song* Jae-Yong, Namkung⁽¹⁾ Jae-Seok, Choi** Yong-Ha, Kim***

* : Korea University ** : Gyeongsang National University *** : Inchon University

ABSTRACT

Based on the concept of Load Supplying Capability of a transmission network, we provides an information concerning network adequacy. In particular this paper describes an algorithm regarding load supplying margin of transmission networks. And a different growth rate is assigned to each load point so that various demand characteristics can be taken into consideration at respective locations. In addition to this, in this paper, both generation and transmission equipment will be considered in determining the system capability.

A 10 bus model system is used to demonstrate the capability of the proposed algorithm.

1. 서론

최근, 신도시의 개발이나 이상기온에 의한 여름철 냉방기의 수요증가 등으로 인해, 수용가의 전력수요가 급속히 증가하고 있다. 이와 같이 증가일로에 있는 전력수요에 대응하여 발전소의 건설 등으로 공급력을 확보하는 것도 중요하지만 발전된 대량의 전기를 장거리에 걸쳐서 안정하게 수송하기 위한 견고한 계통구성 및 전력수송기술의 개발 또한 간과할 수 없는 중요한 부분이다. 전력사업의 장기비전은 향후 무정전, 고품질, 저가격인 전력공급에 대한 욕구가 점점 높아져가는 한편 다양한 제약으로부터 용지의 확보등 전력설비의 신설 및 증설에 대한 상황은 점점 악화될 것으로 예상되고 있다. 이와 아울러 계통의 규모가 증가하고 그 구성이 복잡해짐에 따라 계통사고의 빈도가 증가하고, 사고가 계통에 미치는 영향이 심각해지고 있는 추세이다. 이에 따라 장래의 계통설비를 과부족이 없는 합리적인 계통으로 구성하도록 하는 작업이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 우선, 2회선 선로 중 1회선의 단일사고가 난 모든 경우에 대한 계통의 공급능력을 정량적으로 계산하였으며, 이 계산과정에서 용량제약에 걸린 Bottleneck 설비들을 찾도록 하였다. 이때 모든 상정사상은 같은 중요도를 갖는다고 가정하였다. 그리고, 공급능력의 여유가 없게 되는 경우의 Bottleneck 설비를 1회선씩 보강한 결과를 비교하여 어느 설비의 보강이 효과적인지를 찾도록 하였다.

2.1 송전계통에서의 공급능력의 평가

송전계통에서의 공급능력평가는, 전원 및 송전선로의 용량제약 하에서 부하의 증가에 대해 그 계통의 최대공급능력은 어느정도 까지 가능한지를 찾는 것이다. 이를 위하여 계통부하에 최대의 전력을 공급하는 것을 목적으로 하는 선형계획법을 사용한 최적화문제로 정식화하였다. 이때 전력조류에 관한 식은 선형으로 표현된 직류조류법으로 하여 유효전력조류만을 다루었으며, 부하증가는 지역차가 고려되도록 각 지점마다 부하증가율이 주어지는 것으로 하였다.

공급능력평가에 관한 식을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

$$\text{목적함수 : Max } G = \sum_i G_i$$

제약조건 :

$$Y \cdot \theta = [\begin{matrix} G \\ -L \end{matrix}]$$

$$f = A \cdot \theta$$

$$f_k^{\min} \leq f_k \leq f_k^{\max}$$

$$G_j^{\min} \leq G_j \leq G_j^{\max}$$

$$\sum_i G_i = \sum_i L_i$$

본 연구에서는 수송설비의 공급능력의 평가에 관한 하나의 접근방법으로, 전원 및 수송설비 용량의 제약하에서, 각 부하모선의 각기 다른 부하증가율을 반영한 총부하의 증가에 대해 각 상정사상에서의 계통전체의 공급능력이 어느 정도 대응할 수 있는가를 구하도록 하였다.^{[3][4][5]} 그리고, 이를 이용하여 용량제약에 걸린 Bottleneck 설비들을 찾도록 하였다.^{[6][7]} 또한, 이 각각의 Bottleneck

단, $L_i(t) = L_{i0}(1+r)^t$
G : 발전기의 최대공급능력
L_{i0} : 초기부하
$L_i(t)$: 부하증가율이 r 인 i 모선의 t 년 후의 부하
Y : 어드미리스행렬
θ : 전압위상각ベ터
A : node/link 접속행렬
G_j : j모선의 발전기 출력
L_i : i모선의 부하
t : 시간
f : 선로조류벡터
r : 부하증가율

2.2 Bottleneck 설비와 공급능력여유의 평가

본 연구에서는 모든 선로를 2회선 이상으로 가정하고 1회선의 단일사고가 난 경우에서의 계통으로의 최대공급능력을 정량적으로 계산하였으며, 이 과정에서 용량제약에 걸린 Bottleneck 설비들을 찾도록 하였다. 공급능력의 여유는, 예측부하에 대한 최대공급능력의 차이로 표시하였다. 그런데, 각 상정사상과 공급능력의 여유만으로는 어느설비에 의해 계통의 최대공급능력이 제한되는지를 알 수 없으므로, 각 상정사상에서의 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유간의 대응을 찾도록 하였다. 설비에 따라서는 여러 상정사상에서 Bottleneck 되는 경우가 있는데, 이때는 그들 중에서 공급능력의 여유가 최소가 되는 값을 쓰도록 하였다.

2.3 공급능력여유의 평가에 의한 대책

합리적인 계통계획을 위해서는, 계통의 계획단계에서, 장래의 계통설비를 과부족이 없는 합리적인 계통으로 구성하도록 하는 작업이 필요하다. 이에는 여러 자료 및 지표를 이용한 다양한 방법이 있을 수 있다. 본 연구에서는 이러한 과정의 결과를 간략히 보이기 위하여, 각각의 Bottleneck 설비를 1회선씩 보강한 결과를 비교하여 어느 설비의 보강이 가장 효과가 큰가를 찾도록 하였다.

3. 사례연구

3.1 모델계통의 개요

그림 1은 10모선 26선로의 모델계통을 나타내었다. 부하증가율은 각 모선에서 동일한 비율로 고려하였으며, 각 모선의 부하비율과 발전기 및 송전선로의 용량제약을 각각 표 1, 표 2 및 표 3에 나타내었다.

표 1 부하비율

모선	부하[MW]	부하증가율	비율
①	158	10%	0.109
②	280	10%	0.192
③	80	10%	0.065
④	140	10%	0.096
⑤	360	10%	0.247
⑥	148	10%	0.102
⑦	0	10%	0
⑧	40	10%	0.027
⑨	0	10%	0
⑩	250	10%	0.172
합계	1456		1.000

표 2 발전기 용량제약 [MW]

모선	하한	상한
⑥	100	310
⑦	210	750
⑧	180	510
⑨	60	260
⑩	140	400
합계	690	2230

표 3 송전선로 용량제약

선로	하한[MW]	상한[MW]	임피던스[p.u.]
f _{1-3a}	-120	120	0.027025
f _{1-3b}	-120	120	0.027025
f _{1-5a}	-120	120	0.011820
f _{1-5b}	-120	120	0.011820
f _{1-8a}	-120	120	0.009525
f _{1-8b}	-120	120	0.009525
f _{2-3a}	-240	240	0.126580
f _{2-3b}	-240	240	0.126580
f _{2-4a}	-120	120	0.030490
f _{2-4b}	-120	120	0.030490
f _{2-8a}	-120	120	0.061350
f _{2-8b}	-120	120	0.061350
f _{3-6a}	-260	260	0.045455
f _{3-6b}	-260	260	0.045455
f _{3-7a}	-260	260	0.055095
f _{3-7b}	-260	260	0.055095
f _{3-10a}	-120	120	0.012660
f _{3-10b}	-120	120	0.012660
f _{4-5a}	-120	120	0.019380
f _{4-5b}	-120	120	0.019380
f _{4-10a}	-120	120	0.020835
f _{4-10b}	-120	120	0.020835
f _{5-9a}	-180	180	0.030305
f _{5-9b}	-180	180	0.030305
f _{6-7a}	-130	130	0.024225
f _{6-7b}	-130	130	0.024225

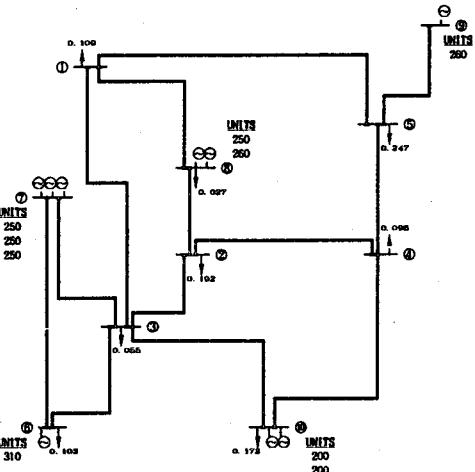


그림 1 10모선 26선로 모델계통

3.2 공급능력의 여유

장래의 계통이 부담해야 할 예측부하를 1600[MW]로 보고 공급능력의 여유를 표 4와 같이 구하였다.

표 4 공급능력의 여유

상정사상	최대공급능력[MW]	공급능력의 여유[MW]	Bottleneck 설비
전차상태	1782	182	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₁₋₃ 중 1회선	1645	45	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₆}}}}
f ₁₋₅ 중 1회선	1524	-76	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₁₋₄ 중 1회선	1625	25	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₂₋₃ 중 1회선	1723	123	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₂₋₄ 중 1회선	1860	260	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}
f ₂₋₈ 중 1회선	1676	76	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₃₋₆ 중 1회선	1782	182	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}
f ₃₋₇ 중 1회선	1782	182	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}
f ₃₋₁₀ 중 1회선	1726	126	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₁₀}}}}
f ₄₋₅ 중 1회선	1765	165	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}
f ₄₋₁₀ 중 1회선	1520	-80	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, G_{6, G₉}}}}
f ₅₋₉ 중 1회선	1644	44	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}
f ₆₋₇ 중 1회선	1776	176	f _{1-8, f_{3-10, f_{4-10, f_{6-7, G₉}}}}

표 4 의 공급능력여유를 바탕으로 각 상정사상에서의 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유간의 대응을 찾으면 그림 2 와 같다. 막대그래프는 공급능력의 여유를, *표시가 겹쳐진 실선은 최대공급능력을 뜻한다.

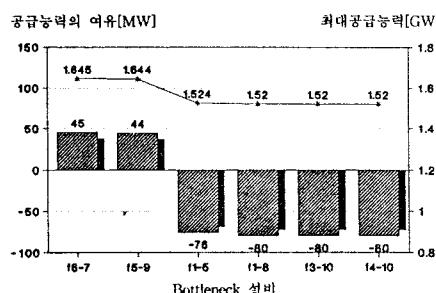


그림 2 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유

3.3 공급능력의 여유에 따른 선로의 보강

장래의 계통설비를 과부족이 없는 합리적인 계통으로 구성하기 위하여, 우선 선로사고시 공급능력의 여유가 음수가 되는 경우, 즉, 예측부하보다 최대공급능력이 떨어지는 경우의 설비들 (f_{1-5} , f_{1-8} , f_{3-10} , f_{4-10}) 을 한 회선씩 보강하여, 다시 한 번 공급능력의 여유를 고려하여 보았다. 그 결과는 표 5 에 나타내었다.

표 5 선로 보강 후의 공급능력의 여유

보강선로	상정사상	최대공급능력[MW]	공급능력의 여유[MW]	Bottleneck 설비
f_{1-5} 1회선	f_{1-5} 중 1회선	1782	182	$f_{1-8}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
	f_{4-10} 중 1회선	1545	-55	$f_{1-8}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
f_{1-8} 1회선	f_{1-8} 중 1회선	1518	-82	$f_{1-5}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
	f_{4-10} 중 1회선	1586	-14	$f_{1-5}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
f_{3-10} 1회선	f_{3-10} 중 1회선	1524	-76	$f_{1-5}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
	f_{4-10} 중 1회선	1456	-144	f_{1-8}, f_{4-10}, G_9
f_{4-10} 1회선	f_{4-10} 중 1회선	1728	128	$f_{1-5}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$
	f_{4-10} 중 1회선	1782	182	$f_{1-8}, f_{3-10}, f_{4-10}, G_6, G_9$

이 표 5 에서 알 수 있는 바와 같이 f_{4-10} 의 1회선을 보강하여 3 회선으로 만든 경우, 종래의 계통에서는 최대공급능력의 여유가 음수가 되던 상정사상에서의 문제점이 해결되었다. 이를 구체적으로 각 상정사상에서의 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유간의 대응으로 나타내면 그림 3 과 같다. 그림 2 에서와 마찬가지로 막대그래프는 공급능력의 여유를, *표시가 겹쳐진 실선은 최대공급능력을 뜻한다.

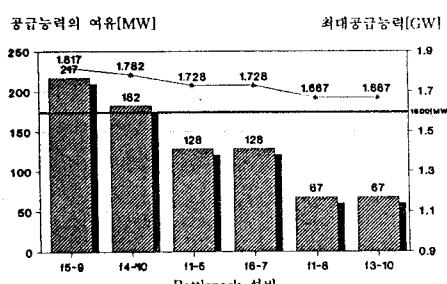


그림 3 f_{4-10} 의 1회선 보강 후의 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유

그림 3 에서 알 수 있는 바와 같이, 단지 ④번 모선과 ⑩번 모선 사이에 선로 하나를 증설하는 것만으로도, 계통은 모든 1회선 상정사상에 대해 1600MW 이상(1667MW 이상)의 공급능력을 유지할 수 있게 되었다.

한편, f_{1-8} 의 1회선을 보강한 경우의 f_{1-5} 중 1회선 상정사상의 경우 라딘가 f_{3-10} 의 1회선을 보강한 경우의 f_{4-10} 중 1회선 상정사상의 경우에는 종래의 계통에서보다도 최대공급능력의 여유가 더 적어졌는데, 이는 Bottleneck 설비의 이동이라든지, 계통에 흐르는 조류의 분배상황의 악화 등에 기인된 것으로 사료된다.

4. 결론

제안한 송전계통에서의 공급능력여유의 평가에 관한 연구에서는 계통으로의 최대공급능력을 구하기 위해, 전원 및 수송설비 용량의 제약하에서, 부하의 증가에 대해 각 상정사상에서의 계통전체의 공급능력이 어느 정도 대응할 수 있는지를 선형계획법을 사용하여 구하였다. 여기에서 구한 최대공급능력과 예측부하의 차이에서 공급능력여유를 구하고, 이를 이용하여 용량제약에 걸린 Bottleneck 설비들을 찾아서, 이 각각의 Bottleneck 설비를 1회선씩 보강한 결과를 비교하여 어느 설비의 보강이 효과적인지를 찾도록 하였다. 이하 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1회선 선로 중 1회선의 단일사고가 난 경우에 대해 계통의 최대공급능력을 선형계획법을 사용하여 정량적으로 계산하였으며, 이 과정에서 용량제약에 걸린 Bottleneck 설비들을 찾을 수 있었다.
2. 제안한 방법으로 계산한 각 Bottleneck 설비와 공급능력의 여유간의 정량적 관계를 이용하여 보강이 시급한 설비를 찾을 수 있었다.
3. 본 방법에서는 각 부하모션의 각기 다른 부하증가율을 반영하여 좀 더 현실적인 결과를 얻을 수 있었다.
4. 장래의 계통설비를 과부족이 없는 합리적인 계통으로 구성하기 위한 기초적 과정으로, 각각의 Bottleneck 설비를 1회선씩 보강한 결과를 비교하여 어느 설비의 보강이 가장 효과가 큰 가를 찾을 수 있음을 보였다. 앞으로는, 실제로 복잡한 계통에 적용하여 전 설비를 합리적이고 효율적으로 운용하도록 여러 설비를 증설, 또는 신설할 수 있는, 좀 더 체계적인 설비의 신·증설방법의 개발이 필요하리라 사료된다.

참고문헌

- [1] 송길영, “송전기 공학”, 동일출판사
- [2] Roy Billinton, “Power System Reliability Evaluation”, 1977
- [3] 송길영, “전력계통의 해석 및 응용”, 동일출판사
- [4] 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
- [5] Billey E. Gillette, “Introduction to Operations Research”, 1976
- [6] “電力系統의 輸送力評價 - 計劃段階에서의 系統余裕의 評價에 關한 考察”, 日本 電力中央研究所 研究報告 T91062, 1992
- [7] “電力系統의 輸送力評價 - 系統余裕의 均一化手法의 開發”, 日本 電力中央研究所 研究報告 T92046, 1993