

돌극형 동기 발전기의 무효전력 공급 한계 해석 및 우선공급계통에의 적용

論 文

56-1-3

Analysis of Reactive Power Capability for Salient Synchronous Generators, and its Application to Primary Restorative Systems

李 興 載* · 朴 誠 民*

(H. J. Lee · S. M. Park)

Abstract - Power system restoration following a massive blackout starts with re-energizing primary restorative transmission systems at first. The comparison of the TLCC(transmission line charging capacity) and the RPC(reactive power capability) of related black-start generator should be considered in this stage because overvoltage can be caused by self-excitation at the generator when the RPC is smaller than the TLCC. The RPC can be decided by two criteria. One is stator end core heating, and the other is steady state stability. RPC in steady state stability area has been found based on a synchronous reactance X_d . This paper presents RPC limit of salient pole machine which is different from that of non-salient pole machine in steady state stability area and shows derivation process about that.

Key Words : black start, reactive capability limitation, blackout, self excitation

1. 서 론

광역정전 또는 정전전이 발생했을 경우 계통 복구 방식은 건전계통으로부터 정전계통을 복구하는 것과 정전계통 내 시송전 계통을 가압한 후 주변 계통을 복구하는 두 가지 방식으로 대별할 수 있다. 시송전 계통의 가압은 수력, 또는 드림형 보일러를 사용한 화력발전기와 같은 자체기동 발전기를 기동한 후, 황색차단기를 통하여 구성된 시송전 선로를 가압하여 우선공급 발전소에 전원을 공급하는 과정으로 이뤄지는데[1-4], 시송전 계통의 선정에서는 다음과 같은 사항들이 반드시 고려되어야 한다.

- 무부하 선로 가압에서 발생하는 시송전 선로의 과전압
- 시송전 선로의 충전용량
- 자체기동 발전기의 무효전력 공급한계

선로 과전압 문제를 해결하기 위해서는 시송전 계통에 과전압을 야기하지 않는 적절한 전압으로 자체기동 발전기를 기동하거나, 선로 중간에 부하를 투입하여 페란티 효과를 보상해 줄 수 있다.

충전용량의 경우, 선로의 모든 전압을 1[PU]로 가정하여 선로 각 구간의 퍼센트 어드미턴스 값을 근거로 간단히 구할 수 있으나, 선로에 공급하는 발전기의 무효전력 여유가 충분하지 않을 경우 약간의 오차에 의해 시송전 가능 여부가 결정되므로, 투입된 부하 및 선로와 변압기의 인덕턴스 성분을 고려한 정확한 충전용량 값을 구할 필요가 있다. 과전압 및 충전용량에 관한 문제 해석을 위해 해외에서는 주

로 전력조류계산법을 사용하는데 그 방법이 복잡하여 사용이 어려움이 보고된 바 있으며[5], 최근 이를 간단한 4단자 망 알고리즘을 사용하여 정밀한 결과를 얻을 수 있음이 발표된 바 있다[6].

일반적으로 발전기 무효전력 공급한계 중 진상 영역은 고정자 엔드 코어(End Core) 과열 문제와 정태 안정도에 의해 한정되는데, 과열 문제에 의한 진상 영역 한계는 발전기 제작사의 스펙으로 주어진다. 만일 선로의 시송전시 송전선로의 충전용량이 발전기의 무효전력 한계를 초과하는 경우 자기여자 현상이 발생하게 되므로[6], 정태 안정도에 의한 발전기의 무효전력 공급한계를 고려하기도 하였으나, 이 때 사용한 무효전력 산정식은 비돌극 회전자, 즉, 화력발전기를 대상으로 유도한 식을 사용하고 있다[7]. 그러나 대부분의 경우 자체기동발전기로는 수력이 많이 사용되고 있으며, 수력자원이 없거나 부족한 경우에만 화력을 채용하는 것이 보편적인 편 아니라 우리나라의 자체기동 발전기는 대부분 수력으로 이루어지고 있으므로 이에 대한 정밀한 검토가 필요하다. 국내 시송전 계통의 경우, 7개의 분할 계통 내에 12개의 자체기동 발전소 중 8 곳이 수력기이며 나머지가 화력기이다.

본 논문에서는 첫째로 기존에 사용되었던 자기여자 현상의 발생 여부에 대한 판별식이 화력 발전기의 비돌극기형 회전자를 대상으로 한 식임을 확인하고, 다음으로 수력 발전기와 같이 돌극기형 회전자를 사용하는 경우의 진상 무효전력 한계식을 유도하였고 이를 사용하여 국내 시송전 계통의 구성에 적용하였다.

† 교신저자, 正會員 : 光云大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : hjlee@kw.ac.kr

* 正 會 員 : 光云大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 9月 20日

最終完了 : 2006年 10月 23日

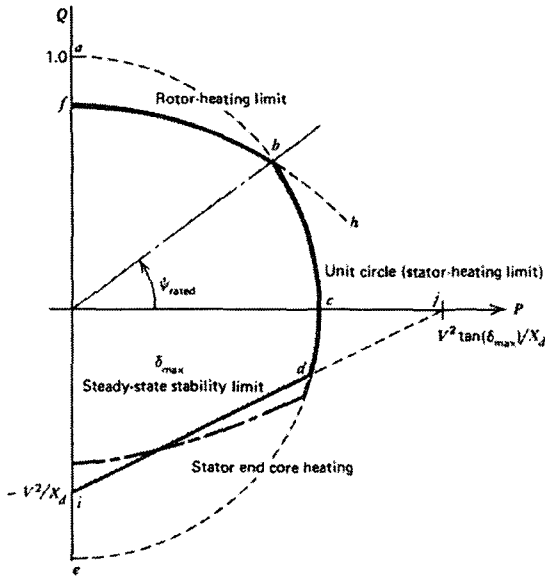


그림 1 발전기 운전 한계
Fig. 1 Generator operating limits

2. 발전기 무효전력 공급 한계

동기 발전기에는 여러 가지 요인으로 인해 운전 영역의 한계가 존재하며, 그림 1은 그 한계를 보여준다. 그림에 나타난 영역 중 a-c-e에 걸친 단위 원은 고정자의 권선에 흐르는 전류에 의해 온도가 상승하여 기기가 소손되지 않도록 하는 한계 범위를 나타낸다. 또한 지상 무효전력 값이 커질수록 발전기 내부유기전압인 E_f 가 커지는데 이를 위해서는 회전자에 계자 권선에 흐르는 전류가 커져야하므로, 회전자 과열 문제가 발생한다. 이러한 문제에 의해 발생하는 한계 범위가 $-\frac{V^2}{X_d}$ 를 중심으로 반지름이 $\frac{VE_{f,max}}{X_d}$ 인 f-b-h이다.

광역정전이 발생한 후 자체기동 발전기를 기동하여 시송전 선로를 가압하는 경우에는 모든 차단기 개방 전략[6]에 의해 시송전 계통이 거의 무부하 상태이므로 발전기의 운전 영역 중 특히 진상 무효전력 영역이 문제가 될 수 있는데, 이는 자체기동 발전기에서 자기여자 현상이 발생하는 것을 방지하기 위해서는 시송전 선로의 충전용량보다 자체기동 발전기에서 최대 공급할 수 있는 진상 무효전력이 더 커야 하기 때문이다.

진상 영역에서의 한계는 2가지가 있으며, 하나는 i-d-j로 나타나는 정상 상태 안정도 한계이고, 다른 하나는 일점 쇄선으로 표시된 고정자 엔드 코어의 과열 문제로 인한 한계(이하 Q_{lim-c})이다. Q_{lim-c} 는 발전기 특성마다 다르므로, 발전기 제작사로부터 주어지는 값이다.

발전기의 정태 안정도에 의한 진상 무효전력 공급 한계는 다음과 같이 구한다. 발전기의 정상상태 등가회로에서 동기 임피던스를 X_d , 내부유기전압을 $E_f \angle \delta$, 단자전압을 $V \angle 0$ 이라 하면, 발전기의 출력 전력은 식 (8)과 같다. 식 (8)의 P, Q를 연립하여 풀면 진상 무효전력 발전 한계는 식 (9)와 같다. 발전기가 무한모선에 연결된 경우, 정상운용 상태에서

는 동기탈조를 방지하기 위해 등면적법에 근거하여 δ 를 20° 이내로 유지한다. 그러나, 시송전의 경우 자체기동 발전기가 동기탈조를 일으킬 대상이 없으며, 자체기동 발전기에 의해 충전된 시송전 선로에 우선 공급 발전기를 연결하는 경우 지상 부하가 유입되므로 $\delta_{max} = 90^\circ$ 로 설정할 수 있으며, 자체기동 발전기의 무효전력 공급 한계는 식 (10)과 같다. 즉, 발전기에서 자기여자 현상이 발생하지 않기 위해서는 Q_{max} 가 시송전 선로의 충전용량보다 커야 한다.

$$\begin{aligned} \bar{S} &= P + jQ = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{V} \left[\frac{\bar{E}_f - \bar{V}}{jX_d} \right]^* \\ &= \frac{VE_f}{X_d} \sin \delta + j \left[\frac{VE_f}{X_d} \cos \delta - \frac{V^2}{X_d} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

$$Q = \frac{1}{\tan \delta} P - \frac{V^2}{X_d} \quad (9)$$

$$Q_{max} = -\frac{V^2}{X_d} \quad (10)$$

시송전 선로의 검토를 위해서 선로 충전용량과 발전기의 무효전력 공급 한계를 비교하는 경우에는 정태 안정도 해석에 근거한 값과 Q_{lim-c} 중 절대값이 작은 것을 한계값으로 설정한다[6]. 그러나, 본 논문에서는 자기여자 현상을 방지하기 위한 발전기의 진상 무효전력 한계값이 주제이므로, Q_{lim-c} 는 무시하고 정태 안정도 해석에 근거한 한계값만을 고려한다.

3. 돌극기형 동기 발전기의 무효전력 한계치 해석

공급 가능한 진상 무효전력의 한계는 회전자의 종류에 따라 다르며, 위의 식 (8)은 회전자가 비돌극기(원통형)인 경우를 전제로 하고 있다. 즉, 발전기에서 자기여자 현상의 발생 여부를 판별하는 기존의 기준식에서는 발전기에서 공급 가능한 진상 무효전력 값을 발전기의 단자전압과 동기 리액턴스의 관계만으로 표현했을 뿐, 회전자의 종류에 의한 진상 무효전력 공급 한계의 차이를 구별하지는 않았다.

화력 발전기는 회전자가 고속으로 회전하므로 X_d 와 X_q 가 거의 동일한 값을 갖는 비돌극기 형을 사용하나, 수력 발전기의 경우에는 X_d 와 X_q 의 값 차이가 크게 나는 돌극기형 회전자를 사용한다.

수력 발전기에서 공급 가능한 진상 무효전력의 한계는 화력 발전기의 한계와는 다르므로 다음과 같이 구한다. 그림 2와 같은 돌극기형 동기에서 내부 유기전력은 식 (11)로 주어진다.

$$\bar{E}_f = jX_d \bar{I}_d + jX_q \bar{I}_q + \bar{V} \quad (11)$$

단, $\bar{V} = V \angle 0^\circ$ (단자 전압)

$\bar{I} = I \angle -\psi$ (단자 전류)

$\bar{E}_f = E_f \angle \delta$ (내부 유기전력)

$\bar{I}_d = I_d \angle \delta - 90^\circ$ (I 의 d축 성분)

$\bar{I}_q = I_q \angle \delta$ (I 의 q축 성분)

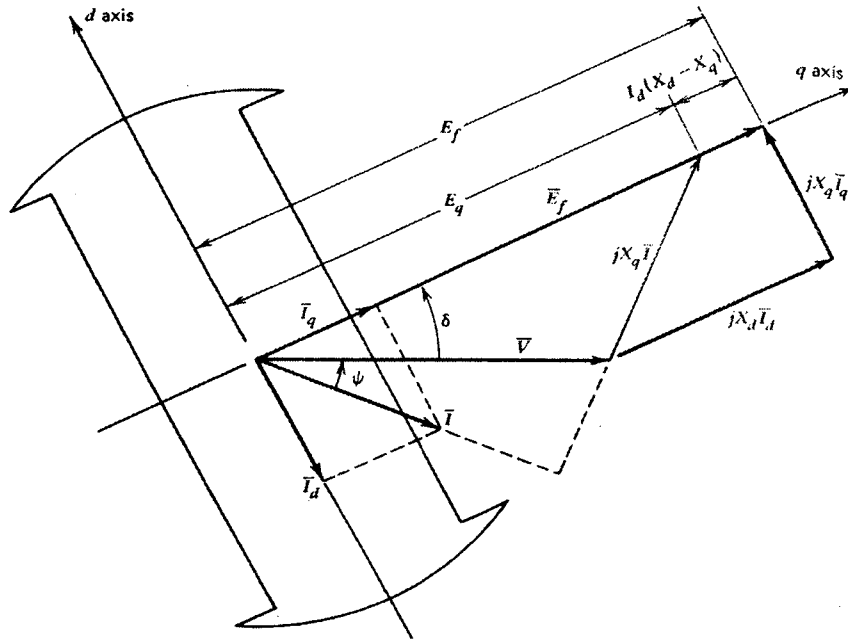


그림 2 돌극기형 동기기의 페이저도
Fig. 2 Phasor diagram for a salient pole generator

$\bar{I}_q = \bar{I} - \bar{I}_d$ 이므로, E_f 는 다음 식 (12)와 같다.

$$\bar{E}_t = j(X_d - X_q)\bar{I}_d + jX_q\bar{I} + \bar{V} = j(X_d - X_q)\bar{I}_d + \bar{E}_q \quad (12)$$

단, $\bar{E}_q = jX_q\bar{I} + \bar{V}$

$$\begin{aligned} j(X_d - X_q)\bar{I}_d &= (X_d - X_q)I_d \angle (90^\circ + \delta - 90^\circ) \\ &= (X_d - X_q)I_d \angle \delta \end{aligned} \quad (13)$$

그림 2에서 식 (13)의 $j(X_d - X_q)\bar{I}_d$ 가 q축 상에 있음을 알 수 있다. $E_f \angle \delta$ 이므로, \bar{E}_t 는 q축 상에 있고, \bar{E}_q 도 q축 상에 있다. 그림 2에서 $\bar{I}_d = \bar{I} \sin(\delta + \psi)$, $\bar{E}_t = E_t \angle \delta$, $\bar{E}_t = \bar{E}_q + (X_d - X_q)\bar{I}_d$ 이므로, 피상전력은 다음 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \bar{V} \bar{I}^* \\ &= \bar{V} [I_q \angle \delta - jI_d \angle \delta]^* \\ &= V \angle -\delta [I_q + jI_d] \\ &= (V \cos \delta - jV \sin \delta) \left(\frac{V \sin \delta}{X_q} + j \frac{E_t - V \cos \delta}{X_d} \right) \\ &= \frac{E_t V}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \\ &\quad + j \left[\frac{E_f V}{X_d} \cos \delta - V^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

위 식 (14)에서 실수부는 발전기에서 공급하는 유효전력이고, 허수부는 무효전력이므로, P와 Q는 다음 식 (15), (16)과 같다. 식 (15)를 식 (17)과 같이 정리하여, 식 (16)에 대입하면, 발전기의 진상 무효전력 한계는 식 (18)과 같다. 시

송전을 전제로 하고 있으므로, 동기탈조를 고려하지 않으면, 돌극기형 발전기의 최대 진상무효전력 공급 한계는 다음 식 (19)와 같다.

식 (11), (19)에서 보는 바와 같이 발전기의 회전자 타입에 따라 비돌극기인 경우에는 X_d , 돌극기인 경우에는 X_q 에 의해 정태 안정도 한계가 결정된다. 수력 발전기인 경우 보통 X_d 가 X_q 보다 크므로, 정태 안정도 한계를 X_d 로 적용할 경우 실제 한계값 보다 더 작은 값을 얻게 된다. 이는 수력기를 자체기동 발전기로 사용하는 시송전 계통에서 식 (19)를 적용하면 충분히 시송전이 가능하지만, 식 (11)을 적용하여 자기여자 발생 문제로 시송전이 안된다는 잘못된 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

$$P = \frac{V E_t}{X_d} \sin \delta + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (15)$$

$$Q = \frac{V E_t}{X_d} \cos \delta - V^2 \left(\frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \quad (16)$$

$$\frac{V E_t}{X_d} = \frac{P}{\sin \delta} + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \frac{\sin 2\delta}{\sin \delta} \quad (17)$$

$$Q = \frac{P}{\tan \delta} - \frac{V^2}{X_q} \quad (18)$$

$$Q_{\max} = -\frac{V^2}{X_q} \quad (19)$$

4. 사례연구

국내 7개의 분할 계통 내 12개의 자체기동 발전소 중에 8개가 수력기이다. 본 사례연구는 자체기동 발전소 중 수력기 타입을 대상으로 하여, 식 (11)과 식 (19)를 적용하였다.

표 1 자체기동 발전기의 진상 무효전력 한계와 송전선로 충전용량

Table 1 RCL of BSGs and TLCC

발전소 번호	Xd기준[MVAR]		Xq기준[MVAR]		공급Q [MVAR]
	RCL	Q여유	RCL	Q여유	
1	87	67.522	87	67.522	19.478
2	175.041	104.746	220	149.704	70.296
3	261.042	175.505	343	257.464	85.536
4	75.325	57.037	100	81.711	18.289
5	84.863	53.897	94.6	63.634	30.966
6	333.51	249.199	446.169	361.858	84.311
7	26.06	13.1	30.751	17.791	12.96
8	335.6	304.461	335.6	304.461	31.139

표 1은 8개의 수력 발전소에서 X_d 와 X_q 에 따른 무효전력 공급한계를 보여준다. 4단자망 알고리즘을 적용하여 발전기에 연결된 시송전 선로의 수전단을 1[PU]로 했을 경우의 충전용량을 구하여 진상 무효전력 한계로부터 공급여유를 구하였다. 단, X_d 와 X_q 에 의한 차이 비교를 목적으로 하였으므로, Q_{lim-c} 는 무시하였다. 발전소 1번과 8번의 경우 진상 무효전력 한계가 X_d 나 X_q 에 상관없이 같은 값이 나오는데, 이는 식 (11), (19)의 결과 값이 발전기들의 정격용량 총합보다 크기 때문에 진상 무효전력 한계를 정격용량의 총합으로 설정한 경우이다.

5. 결 론

본 논문에서는 광역정전사고의 복구시 최초로 기동되는 시송전 계통의 해석시 가장 중요한 요소인 자기여자 현상 방지를 위한 자체기동 발전기 무효전력 공급식에서 돌극형 발전기의 무효전력 한계식을 제시하였다. 자체기동 발전기의 무효전력 공급 한계를 계산할 때 기존에는 비돌극기를 대상으로 유도된 식을 사용하였으나, 본 논문에서는 비돌극기와 돌극기의 무효전력 공급 한계가 다름을 보이고, 돌극기의 진상 무효전력 한계식을 유도하였다. 사례연구로서 국내 시송전 계통 중 수력기를 자체기동 발전소로 하는 계통을 대상으로 기존의 방식과 본 논문에서 유도한 방식으로 진상 무효전력 한계를 구하였으며, 이를 해당 계통의 선로 충전용량과 비교하였다. 앞으로 비상시 급전계획을 검토함에 있어서 본 논문에서 제시한 한계식을 적용하면 시송전 계통 후보의 확보과정에서 보다 정밀한 분석을 수행할 수 있을 것으로 본다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 광운대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] M. Adibi, P. Clelland, L. Fink, H. Happ, R. Kafka, J. Raine, D. Scheurer, F. Trefny, "Power System Restoration - A Task Force Report" IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 2, pp. 271-277, May 1987.
- [2] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration - A Second Task Force Report", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 2, No. 4, pp. 927-933, November 1987.
- [3] M. M. Adibi et al., "Power System Restoration Issues", IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19-24, April 1991.
- [4] M. M. Adibi et al., "Special Consideration in Power System Restoration The Second Working Group Report", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 9, No. 1, pp. 15-21, February 1994.
- [5] J. A. Huang et al., "Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization", IEEE Proceeding of the PICA Conference, May 1994.
- [6] 이흥재 외, "시송전 계통에서 자기여자 현상의 새로운 해석 알고리즘 개발", 대한전기학회논문지, 54A권, 4호, pp. 117-121, 2005
- [7] M. M. Adibi et al., "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines", IEEE Trans. on PWRS, Vol. 9, No. 1, pp. 29-40, February 1994.

저 자 소 개



이 흥 재 (李 興 載)

1958년 1월 28일 생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수
Tel : 02-940-5147
E-mail : hjlee@kw.ac.kr



박 성 민 (朴 誠 民)

1976년 2월 13일 생. 1999년 광운대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 02-940-5147
E-mail : smpark@kw.ac.kr