

부하의 동특성을 고려한 TCSC 에 의한 전압 붕괴의 예방

○ 조 정현, 손 광명, 이 상호, 박 중근, 이 병하
 서울대학교 전기공학과, 인천 대학교 전기공학과

Voltage Collapse Protection Considering Dynamics of Load

J.H.Cho, K.M.Son, S.H.Lee, J.K.Park, B.H.Lee
 Seoul National University University of Incheon

Abstract- Nowadays, voltage stability is well recognized as an important problem. It is well known that voltage stability is influenced by the characteristics of load. Up to present, voltage stability researches were done by the static load modeling, but it is needed that the precise analysis by the view point of dynamic load modeling. In this paper, with induction motor as dynamic load, I show the voltage collapse mechanism followed by load increase. Then I propose the protective method of voltage collapse by using TCSC.

점에 평형상태로 유지되고 있다. 이 때, 부하가 T1 로 변한다면 slip은 s2 로 변하려 할 것이다. 그러나 slip의 변화에 의해서 전압이 떨어지게 되므로 실제로는 s2 점에서 평형을 이루지 못하고, s3 으로 가려할 것이다. 그러나 s3 점에서도 전압이 감소하여 부하를 만족하지 못하고 이 때에 이르러서는 어떤 slip 값에 있어서도 부하를 만족시키지 못하므로 붕괴가 일어나게 된다. 이 현상은 과부하 상태가 아니라도 일어날 수 있는 현상이고, 그 예를 다음에 보인다. 다음과 같은 계통에 관하여 simulation을 시도하였다.

1. 서론

많은 대규모 전력계통에서 전압 불안정 현상이 보고되고 있다. 이에 따라 전압안정성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 과거에는 조류계산의 Jacobian의 특성을 이용한 연구가 활발하였고 최근에는 부하의 동특성을 고려한 연구도 진행되고 있다[1],[2],[3]. 이와 함께 제어기기를 사용한 전압안정성 향상의 연구도 진행되고 있다.[4] 본 연구에서는 유도 전동기를 부하로 채택한 계통에서 일어날 수 있는 전압 붕괴현상의 mechanism을 설명 하겠다. 그리고, 이 설명을 근거로 TCSC를 이용하여 전압 붕괴를 예방할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.[5],[6],[7].

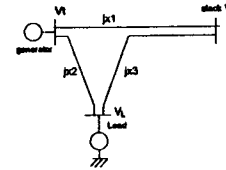


그림2. 대상 계통

발전기는 2-axis model 을 사용하였고, IEEE Type-1 Exciter를 사용하였다. 부하는 유도 전동기를 사용하였고, model 과 dynamic equation은 다음과 같다. [1],[8]

2. 본론

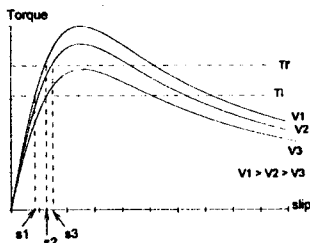


그림 1. 유도 전동기의 slip-Torque 곡선

위의 그림1.은 유도 전동기의 slip과 torque 의 특징을 나타내는 그림이다. 그림1.에서 알 수 있듯이 단자전압이 감소하면 유도 전동기의 최대 torque 의 양이 감소하게 된다. 만약 급격한 부하 증가가 있다면 이 때에는 slip이 급격히 증가하려 할 것이고 이 때 만약 전압의 감소에 의해 부하가 요구하는 torque를 내지 못할 경우에는 전압은 붕괴하게 된다.

이를 자세히 설명하면 다음과 같다. 우선 초기에는 s1



그림3. 유도 전동기 모델

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2Hm} (T_L - P_e)$$

$$(유도 전동기 식, 단, P_e = \frac{r_m \cdot s}{r_m^2 + s^2 x_m^2} V_L^2)$$

계통의 parameter는 다음과 같다.

$$jx1=j0.5, jx2=j0.2, jx3=j0.5$$

$$T_L=1.1, P_g=1$$

$$rm=0.05, xm=0.2$$

외란은 1초에서 부하의 torque 가 10 % 증가한 것으로 하였고 그 결과는 다음과 같다.

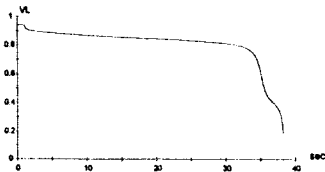


그림4. 부하 증가시 부하단 전압의 변화

이 계통에 있어서 조류계산시의 한계치는 부하의 전력이 1.5 (p.u)일 때 이므로 과부하 상태라 할 수 없다. 그러나 부하의 급격한 증가시에는 과부하가 아니라도 전압 붕괴가 일어날 수 있음을 simulation 결과에서 알 수 있다. 또, 이 현상은 프랑스와 일본 동경계통의 전압붕괴현상에서도 보고된 현상으로 실제로도 충분히 일어날 수 있는 현상이다.[9]

다음으로는 붕괴현상의 mechanism을 보이도록 하겠다. 우선 부하 증가시 일어나는 현상을 단계별로 보이도록 하겠다.

1. 우선, 부하의 증가는 $ds/dt > 0$ 인 상태로 만든다. (부하가 T_L 에서 T_L' 로 증가했다고 생각한다.)
2. $ds/dt > 0$ 이므로 slip은 증가하게 된다.
3. slip의 증가는 Pe의 증가를 부르고 이 증가는 T_L -Pe의 값이 0으로 될 때까지 계속될 것이다.
4. ds/dt 의 값은 시간이 지날수록 작아지게 될 것이다. 왜냐하면 Pe의 값이 계속 증가하고 T_L 의 값은 일정하기 때문이다.

그러면, slip의 증가가 Pe의 증가에 어떻게 영향을 미치는지 알아보자. 그러기 위하여 Pe를 slip의 함수로 표현해 보도록 하겠다.

$$Pe = \frac{r_m \cdot s}{r_m^2 + s^2 x_m^2} V_L^2$$

$$V_L = z_L / d \times (V_r \cdot jx_3 + V_\infty \cdot jx_2)$$

$$(단, d = -(x_m \cdot x_2 + x_m \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3) + j \cdot r_m / s,$$

$$z_L = r_m / s + jx_m)$$

$s(kT)$ 와 $s((k+1)T)$ 에 대하여

$m = Pe(s((k+1)T)) / Pe(s(kT))$ 라고 한다면 m의 의미는 다음과 같이 생각할 수 있다.

$m > 1$ 일 경우: slip의 증가가 Pe의 증가를 수반한다는 이야기이고, m의 값이 증가하면 할수록 slip의 증가가 많은 Pe의 증가를 가져온다고 할 수 있다.

$m < 1$ 일 경우: slip의 증가가 Pe의 감소를 가져오는 상태이다.

즉, $ds/dt > 0$ 인 경우에 slip이 증가하게 되는데 slip의 증가가 Pe의 값의 감소를 유발하고 ds/dt 의 값은 그로 인하여 더욱 증가하게 되고 slip이 더욱 증가하게 된다. 즉 $m < 1$ 일 경우 slip은 더욱 증가하게 되어 전압 붕괴가 일어나게 된다.

그럼 s가 증가함에 따라 m가 어떻게 되는가를 살펴보겠다.

우선, Pe의 slip에 대한 변화를 보면 다음과 같다.

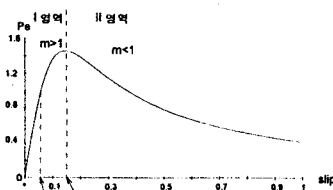


그림.5.Pe-slip곡선

그림5. 에서 알 수 있듯이 s_0 를 경계로 m의 값이 바뀔 수 있다. 즉, I 영역에서는 slip이 증가하면 Pe가 증가하므로 $m > 1$ 인 영역이고, II영역에서는 slip이 증가하면 Pe가 감소하므로 $m < 1$ 인 영역이다.

이를 통해 우리는 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 만약 외란이 일어났을 때 m의 값이 작아서 Pe의 증가량이 상대적으로 작을 경우 오랜시간 동안 slip은 계속 증가할 것이다. 그런데 slip의 값이 증가하면서 어느 값 이상 된다면 이 계통은 붕괴의 과정을 거칠 것이다. 즉, 다음과 같은 생각을 할 수 있다. 외란이 발생할 경우에 경우에 m이 상대적으로 클 경우, ds/dt 는 상당히 빨리 0으로 수렴할 것이다. 그러나, m이 상대적으로 작을 경우 ds/dt 는 느린 속도로 0으로 수렴하려 할 것이고 $ds/dt > 0$ 인 기간 중 slip이 $m < 1$ 인 영역으로 들어갈

어 간다면 계통은 붕괴의 과정을 겪게 될 것이다. 그럼, 전압붕괴는 어떤 parameter에 영향을 받는지 생각해 보겠다. 그러기 위해서 다시 한번 slip과 Pe와의 식을 생각해 보면, 그림에서 보듯이 m의 값이 바뀌는 점은 s_0 이다. 만약, 초기의 slip이 s_1 이 s_0 점과 멀리 떨어져 있으면 즉, s_0 의 값이 큰 값을 가진다면 m의 값이 설령 상대적으로 작더라도 $m < 1$ 인 영역으로 들어갈 가능성은 상대적으로 작을 것이다. 그러면 s_0 의 값을 오른쪽으로 옮기는 방안에 대하여 생각해 보겠다. 우선 s_0 점을 구하여 보자.

$$Pe = \frac{r_m \cdot s}{r_m^2 + s^2 x_m^2} V_L^2$$

$$= \frac{r_m \cdot s}{r_m^2 + s^2 x_m^2} |z_L / d \cdot (V_r \cdot jx_3 + V_\infty \cdot jx_2)|$$

$$= \frac{c}{a/s + b \cdot s}$$

$$(단, a = r_m^2 \cdot (x_2 + x_3)^2, b = (x_m x_2 + x_m x_3 + x_2 x_3)^2)$$

이 때, s_0 의 값을 구하여 보면 다음과 같다.

$$s_0 = r_m \cdot (x_2 + x_3) / (x_2 \cdot x_m + x_3 \cdot x_m + x_2 \cdot x_3)$$

$$= r_m / (x_m + x_2 \cdot x_3 / (x_2 + x_3))$$

위 수식에서 m, x_m 과 같은 유도전동기 상수는 일정하다고 생각하고 선로의 임피던스 값을 바꿀 수 있다고 생각을 하면 x_3 의 값을 줄임으로 인해 s_0 의 값을 오른쪽으로 이동시킬 수 있음을 알 수 있다. 즉, x_3 의 값의 조정을 통하여 급격한 부하 증가시 전압 붕괴가 일어날 가능성을 줄일 수 있을 것이다.

다음으로 급격한 부하 증가에 따른 전압의 붕괴 현상을 방지할 수 있는 TCSC의 보상량에 대하여 생각하여 보겠다.

우선 10% 부하 급변시에 전압 붕괴를 예방할 수 있는 기법에 관하여 설명하겠다.

1. 우선, 지금 상태의 slip의 평형값 s_1 을 정한다.

$$2. \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2Hm} (T_L - \frac{r_m \cdot s}{r_m^2 + s^2 x_m^2} V_L^2) \text{ 식에서 보면 평형상}$$

태에서 부하가 10% 증가하였을 때 ds/dt 의 값은 다음과 같다.

$$\frac{ds}{dt} = \frac{0.1 \cdot T_L}{2 \cdot H_m} \text{ (단, } T_L \text{은 평형상태의 부하량, 0.1은 10\%}$$

를 나타냄)

3. 동작점에서 선형화를 하면 slip에 관하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d\Delta s}{dt} = -\frac{1}{T_s} \Delta s$$

여기서 T_s 는 동작점에서 slip의 시정수라 생각할 수 있다.

4. 이 때, 다음 순간의 slip의 값은 대략 다음과 같다.

$$s_2 \approx s_1 + T_N \cdot (ds/dt)$$

5. 구한 s_2 를 가지고 전압 V_L 을 구하고 그리고 나서

$$P_e = \frac{r_m \cdot s_2}{r_m^2 + x_m^2 \cdot s_2} V_L^2 (s_2) \text{ 을 구한다.}$$

6. $T'_L = 1.1 \cdot T_L$ 로 하고 $i = T'_L - P_e(s_2)$ 의 부호를 본다.

7. i 의 값이 0보다 작을 경우 다음을 의미한다.

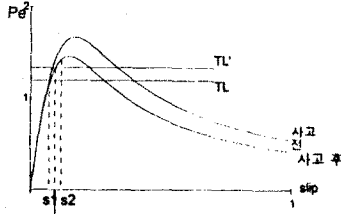


그림 6. i 가 0보다 작은 경우

i 가 0보다 작다는 것은 선형화 가정에서 추정된 s_2 값에서 P_e 가 T_L 보다 크다는 뜻이고, 다시 말하면 외란이 일어났을 경우 s_2 에 이르기 전 s_0 값에서 이미 평형 상태에 도달하였다라고 말할 수 있다.

i 가 0보다 큰 경우

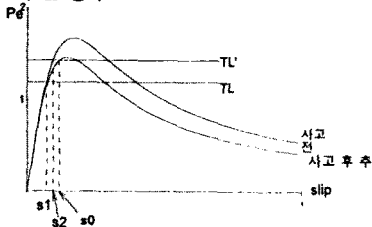


그림 7. i 가 0보다 큰 경우

i 가 0보다 큰 경우에는 선형화 식에서 추정된 s_2 값에서 P_e 가 T_L 보다 작다는 뜻이고, 그것은 slip이 계속 증가하려 함을 의미한다. 또, 그것은 전압 붕괴의 가능성이 있음을 의미한다..

8. 그러므로 i 값이 0보다 작도록 선로의 임피던스를 조정하면 급격한 외란시 일어날 수 있는 전압 붕괴 현상을 방지할 수 있을 것이며, 이와 같은 순서로 TCSC 보상량을 정하면 급격한 부하 증가가 일으킬 수 있는 전압 붕괴를 방지할 수 있다.

3. 사례 연구

다음은 처음에 보인 붕괴 현상을 TCSC의 보상량을 조정함에 의해 예방하는 예를 보인 것이다. 붕괴가 일어났던 계통에 붕괴가 일어나기 전 상태에서 10% 부하 증가를 상정하여 s_2 를 추정하여 i 를 구해보면 $i = 0.0141$ 로 된다. 이는 부하가 10% 급격히 증가 하였을 경우 붕괴를 할 가능성이 크다는 것을 알 수 있다. i 의 값을 0보다 작게 하기 위하여 x_2 의 값을 TCSC를 이용해 줄인다고 하면 $x_2 = 0.4$ 일 때, i 의 값이 0보다 크게 된다. $x_2 = 0.4$ 로 놓고 앞과 같은 부하 증가를 외란으로 가한 경우, simulation을 한 결과 전압이 안정점을 찾아가음을 알 수 있다.

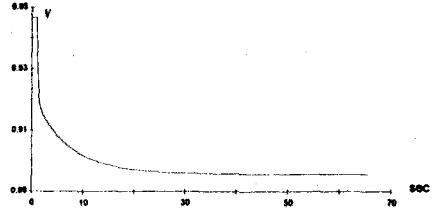


그림 8. 부하단 전압의 변화

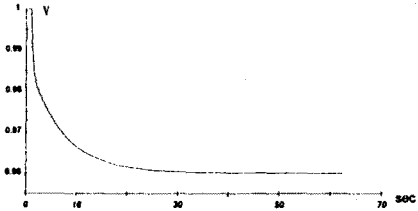


그림 9. 발전기단 전압의 변화

4. 결론

본 논문에서는 급격한 부하증가가 전압 붕괴를 초래할 수 있다는 사실을 부하를 유도전동기를 사용하여 보았다. 그리고 간단한 계통에서 TCSC를 사용하여 급격한 부하증가가 유발할 수 있는 전압 붕괴를 예방할 수 있는 기법을 제시하였다. 그러나, 유도전동기를 직접 사용하는 것은 일반성면에서 많은 문제를 가지고 있으므로 더욱 일반적인 부하 모델을 사용한 계통에 대해서 붕괴 현상을 연구하는 것이 필요하다고 생각한다.

5. 참고 문헌

- [1] Y. Sekine, H. Ohtsuki, "CASCADED VOLTAGE COLLAPSE", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 5. No. 1, pp. 250-256, February, 1990
- [2] Th. Van Cutsem, "DYNAMIC AND STATIC ASPECTS OF VOLTAGE COLLAPSE", EPRI EL-6183 Project 2473-21 Proc., pp. 6.55-6.79, Jan., 1989
- [3] M. Pal, "Voltage Stability Conditions Considering Load Characteristics", IEEE Trans. on Power Systems, Vol 7, No. 1, pp. 243-249, Feb. 1993.
- [4] A.E. Hammad, "Comparing the Voltage Control Capabilities of Present and Future VAr Compensating Techniques in Transmission Systems", IEEE-PES Winter Meeting, New York, Jan. 29-Feb. 2, 1995
- [5] 조 정현, 손 광명, 이 상호, 박 종근, 이 병하, "동적부하를 고려한 TCSC에 의한 전압 안정화", 대한전기학회 춘계 종합 학술대회 논문집, pp. 16-19, 1995.5
- [6] 한국 전력공사 기술 연구원, "전력계통 안정도 해석을 위한 적정 부하 모델에 관한 연구(최종 보고서)", 1990.10월
- [7] 손 광명, 조 정현, 박 종근, 이 병하, "싸이리스터 제어 직렬 보상기에 의한 전력계통 안정화 효과", 대한전기학회 춘계 종합 학술대회 논문집, pp. 9-11, 1994.11월
- [8] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control", IEEE Press, 1977
- [9] IEEE 90TH0358-2-PWR, "Voltage Stability of Power Systems: Concept, Analytic Tools and Industrial Experience", IEEE Inc., 1990.