

## 변압기 탭영향을 고려한 에너지함수를 이용한 전압안정도 해석

김범식 권용준 이기제 문영현  
연세대학교 전기전자공학과

### Voltage Stability Analysis Based on Energy Function considering Tap of Transformer

Beom-Shik Kim, Yong-Jun Kwon, Ki-Je Lee, Young-Hyun Moon  
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University

**Abstract** - 본 논문에서는 전력계통에서 에너지 함수를 이용하여 탭의 영향이 고려된 전압안정도 해석방법을 제시하였다. 전력계통의 전압안정도 해석은 부하단 변압기 탭의 특성과 밀접하게 연관되어 있으며 역학적 등가모델(EMM)을 이용하여 탭의 영향을 고려한 새로운 에너지 함수를 유도 하였다. 이 에너지 함수는 Lyapunov 함수의 조건을 만족시키며, 유도된 에너지함수로부터 안정평형점과 불안정평형점을 구하여 두 점에서의 에너지의 차이로서 전압붕괴를 예측할 수 있음을 1기 무한대 모션에 대하여 검증해 보았다.

#### 1. 서 론

전력계통과 같은 비선형 시스템에 있어서 전압안정도는 중요한 문제 중에 하나이다. 이러한 전압안정도를 분석하기 위해서 많은 사람들이 Lyapunov 방법이나 Popov 방법들을 사용하여 시스템의 각종 변수들을 정형화하면서 여러 연구들이 이루어져 왔으나 기존에는 모든 변수를 연속적인 것으로 고려하여 탭이나 커패시터와 같은 이산적으로 변하는 변수에 대하여 세밀하게 고려할 필요가 있게 되었다. 따라서 이러한 요소들이 고려되었을 때 부하의 증감이나 무효전력의 변화에 따른 안정도를 분석함으로써 정확한 안정 여유도를 산출하고 더 나아가 전압붕괴에 대한 분석도 철저히 이루어져야 할 것이다. 이제까지 Hybrid 시스템에 대한 Lyapunov 함수의 연구로 이산적으로 변하는 시스템에 대한 연구가 전반적으로 이루어져 왔으며[1-2] 전력계통에 대한 적용도 연구되어지고 있다. 기존의 연구에서 Overbye는 structure-preserving 모델을 이용하여 계통을 분석하면서 [3] 탭이 고려되지 않은 일반적인 시스템에 관하여 에너지 함수를 유도하고 SEP와 UEP를 구함으로써 에너지 마진으로 시스템의 안정 여유도를 알아보는 연구를 수행해 왔으며 부하의 변화에 따른 전압의 변화를 나타내는 P-V 곡선도 나타내 볼 수 있었다.[4-5]. 여기서 탭과 같은 이산적으로 변화하는 요소를 더욱 자세히 고려하면 좀 더 확실한 안정여유도를 판별하고 전압붕괴를 예상할 수 있게 될 것이다. 부하 모델의 변화에 따른 탭의 동작특성에 관한 일반적인 연구는 여러 분야에서 이루어져 왔으나 [6-7] 전력계통에서의 직접적인 적용은 아직 미비한 상태이다. 또한 탭의 변화에 따른 Lyapunov 함수의 구간별 적용이라든지 부분 구간에서 Limit 있는 현상이 발생하는 것도 부분적으로 연구되어져 오고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 계통을 EMM으로 전압붕괴에 관하여 분석하는 연구[8-9]는 많은 도움이 될 것으로 보이며 탭이 반영된 회로에 대해서도 같은 방법으로 EMM을 적용하여 에너지 함수를 유도할 수 있을 것으로 보고 있다.

따라서 본 논문은 탭이 고려된 전력계통의 회로를 EMM(Equivalent Mechanical Model)을 이용하여 분석해 보고자 하여 EMM으로 탭이 고려된 에너지 함수를 유도하고 그 함수의 미분이 영보다 작은 것을 수식으로 증명함으로써 Lyapunov 함수의 성질을 가지고 있음을 보

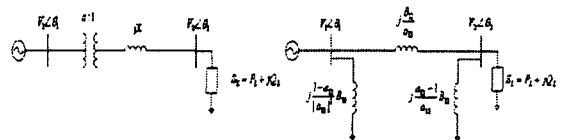
여주었다. 또한 이 에너지 함수의 SEP와 UEP를 구하여 SEP 에너지와 UEP 에너지의 차이를 구함으로써 에너지 마진을 계산하여 전압안정도를 분석하였고 전압붕괴가 일어나는 경우도 파악하여 전압붕괴를 예측하고 대비할 수 있도록 하였다. 실제적으로 1기 무한대 모션에서 탭이 고려된 변압기가 포함된 회로를 이용하여 시뮬레이션함으로써 검증해 보았다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 탭이 고려된 변압기가 포함된 회로에 대한 에너지함수 유도

전력 계통을 해석하기 위하여 많이 사용되는 역학모델은 전압이 일정하다는 가정하에서 각 발전기의 관성체가 스프링에 의하여 연결된 모델을 사용하고 있으나 이러한 모델은 전압이 일정하다는 가정 때문에 제약이 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 변화하는 전압을 반영할 수 있는 새로운 등가역학 모델을 사용한다. 이 등가역학 모델을 기반으로 얻어지는 역학방정식을 사용하면 계통의 미소변화량을 구하고 계속해서 미소에너지 변화량을 적분하여 계통의 전체 에너지를 구한 후 Lyapunov 특성을 갖는 에너지 함수를 도출해 낼 수 있다.

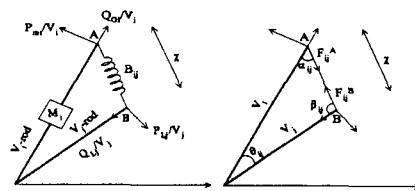
다음과 같은 샘플 2모선 계통에 대하여 EMM을 사용하여 에너지 함수를 유도하고자 한다.



$$B_{ij} = -(1 / X_{ij})$$

그림 1. Sample 2모선 계통

그림 2.  $\pi$  - 등가회로



Mi : Generator Inertia  
그림 3. EMM과 Force Diagram

그림 3에서 A점과 B점에 작용하는 탄성력  $\overline{F}_{12}$  와  $\overline{F}_{21}$  를  $\hat{r}$  과  $\hat{\theta}$  로 나타내면 아래와 같다.

$$\overline{F}_{12} = -\frac{B_{12}}{a_{12}}(v_1 - v_2 \cos \theta_{12})\dot{r} - \frac{B_{12}}{a_{12}}v_2 \sin \theta_{12}\dot{\theta} \quad (1)$$

$$\overline{F}_{21} = -\frac{B_{12}}{a_{12}}(v_2 - v_1 \cos \theta_{21})\dot{r} - \frac{B_{12}}{a_{12}}v_1 \sin \theta_{21}\dot{\theta} \quad (2)$$

또한 각 점에서의 평형식을 세우면 다음과 같이 된다.

$$\overline{F}_1 = \frac{-M_1\ddot{\theta}_1 - D_1\dot{\theta}_1 + P_{m1}}{V_1}\dot{\theta} + \frac{Q_{G1}}{V_1}\dot{r} - \frac{(1 - a_{12})B_{12} \cdot V_1}{a_{12}^2}\dot{r} + \overline{F}_{12} \quad (3)$$

$$\overline{F}_2 = -\frac{P_{L2}}{V_2}\dot{\theta} - \frac{Q_{L2}}{V_2}\dot{r} - \frac{(a_{12} - 1)B_{12} \cdot V_2}{a_{12}}\dot{r} + \overline{F}_{21} \quad (4)$$

$i$  모선전압벡터의 미소변위는 다음과 같이 나타낼 수 있으므로

$$d\overline{V}_i = dV_i\dot{r} + V_id\theta_i\dot{\theta} \quad (5)$$

1 모선과 2 모선에서의 에너지의 미소변화량을 구하면 다음과 같다.

$$dW_1 = \overline{F}_1(dV_1\dot{r} + V_1d\theta_1\dot{\theta}) \quad (6)$$

$$dW_2 = \overline{F}_2(dV_2\dot{r} + V_2d\theta_2\dot{\theta}) \quad (7)$$

위 식을 이용하면 계통전체의 미소에너지 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있고

$$\begin{aligned} dW &= \frac{1}{2}(\sum_i dW_i + \sum_j dW_j) \\ &= \sum_{i=1}^2 \frac{Q_{Gi} - Q_{Li}}{V_i} dV_i + \sum_{i=1}^2 (P_{mi} - P_{Li}) d\theta_i \\ &\quad - \frac{1}{4} \sum_{i=1}^2 \frac{(a_{12} - 1)^2}{a_{12}^2} B_{12} d(V_i^2) \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j \neq i}^2 \frac{B_{12}}{a_{12}} d(V_i V_j \cos \theta_{ij}) - M_1 \ddot{\theta}_1 d\theta_1 \\ &\quad - D_1 \dot{\theta}_1 d\theta_1 \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 계통 전체의 에너지는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} W &= \int \sum_{i=1}^2 \frac{Q_{Gi} - Q_{Li}}{V_i} dV_i + \int \sum_{i=1}^2 (P_{mi} - P_{Li}) d\theta_i \\ &\quad - \frac{1}{4} \int \sum_{i=1}^2 \frac{(a_{12} - 1)^2}{a_{12}^2} B_{12} d(V_i^2) \\ &\quad + \frac{1}{2} \int \sum_{i=1}^2 \sum_{j \neq i}^2 \frac{B_{12}}{a_{12}} d(V_i V_j \cos \theta_{ij}) - \int M_1 \ddot{\theta}_1 d\theta_1 \\ &\quad - \int D_1 \dot{\theta}_1 d\theta_1 \end{aligned} \quad (9)$$

이 계통의 전체 에너지 식에서 세 번째, 네 번째 적분항들을 정리해서 계통의 전체 에너지를 정리한 후 에너지

함수를 끌어내면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} E &= - \int \sum_{i=1}^2 \frac{Q_{Gi} - Q_{Li}}{V_i} dV_i - \int \sum_{i=1}^2 (P_{mi} - P_{Li}) d\theta_i \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \left[ \frac{(a_{12} - 1)^2}{a_{12}^2} B_{12} V_i^2 - \frac{(a_{12o} - 1)^2}{a_{12o}^2} B_{12o} V_{io}^2 \right] \\ &\quad - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j \neq i}^2 \left( \frac{B_{12}}{a_{12}} V_i V_j \cos \theta_{ij} - \frac{B_{12o}}{a_{12o}} V_{io} V_{jo} \cos \theta_{jio} \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} M_1 (\omega_1^2 - \omega_{1o}^2) \end{aligned} \quad (10)$$

이 에너지 함수가 Lyapunov함수의 조건을 만족시키기 위해서는 함수의 미분값이 항상 0보다 작거나 같아야 하므로 다음과 같이 미분을 구해본다.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= -D_1 \dot{\theta}_1^2 - \sum_{i=1}^2 \frac{(a_{12} - 1)^2}{a_{12}^2} B_{12} V_i^2 \dot{a}_{12} \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j \neq i}^2 \frac{B_{12}}{a_{12}^2} V_i V_j \cos \theta_{ij} \dot{a}_{12} \end{aligned} \quad (11)$$

이 미분식에서 보았을 때 전압붕괴가 점진적인 전압강하를 특성으로 갖는다면 탭의 시간에 대한 변화율  $\frac{da}{dt}$  는 0보다 작거나 0이 되므로 위 식의 모든 항이 음의 값을 가지게 되어 Lyapunov함수 조건을 만족시킨다고 할 수 있다.

## 2.2 제안된 에너지 함수의 시뮬레이션 결과

제안된 에너지 함수의 효용성을 검증하기 위해서 탭이 반영된 변압기가 포함된 1기 무한대 모선에 대하여 고려해 보고자 한다.

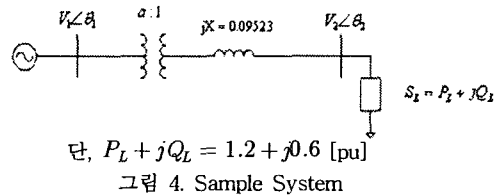


표 1. 1기 무한대 모선 시스템에 대한 초기 데이터

(a) Line Data

From_Bus	To_Bus	R	X	Tap
1	2	0.0000	0.09523	0.9875

(b) Bus Data (Type : Slack = S, P-V = V, P-Q = Q)

No	Type	V	Theta [deg]	$P_g$ [MW]	$Q_g$ [MVAR]	$P_L$ [MW]	$Q_L$ [MVAR]
1	S	1.05	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0
2	Q	1.00	-0.1076	0.0	0.0	120.0	60.0

(단, 2번 모선에 대하여 표의 값은 SEP값이며 UEP의 초기값은  $V = 0.12776$ ,  $\theta = -0.9995$ 를 사용하였다.)

이러한 모델에서 부하 P가 변함에 따라 탭이 고려된 변압기가 어떠한 영향을 미치며 안정 여유도는 어떻게 측정되는지 알아보기 위하여 아래와 같은 부하 변화량을 고려해 보도록 한다.

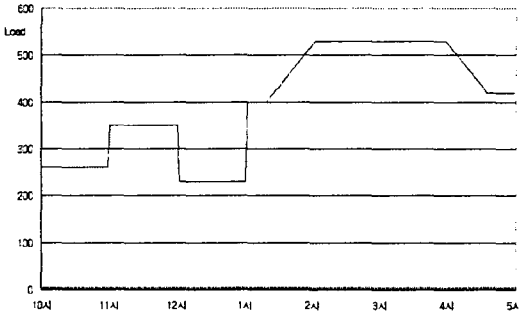
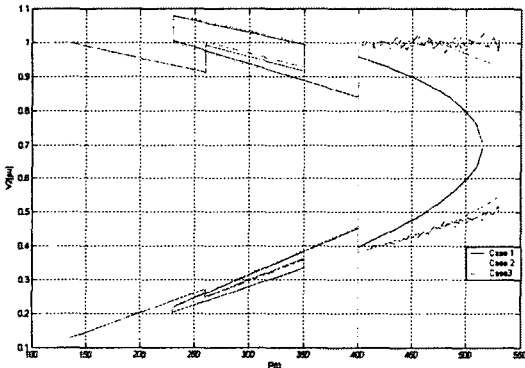


그림 5. 부하 변화량

그림 5는 하루 동안의 일부하 변동의 예시를 보여준 것으로 밤 10시부터 오후 5시까지를 선택하여 부하의 변화량을 보여준 것이다. 이런 부하의 변화에 따른 전압과 에너지 마진의 변화는 다음과 같이 보여진다.



단, case 1 :  $\Delta a = 0.00652[\text{pu}]$   
 case 2 :  $\Delta a = 0.009375[\text{pu}]$   
 case 3 :  $\Delta a = 0.012500[\text{pu}]$   
 ( $\Delta a$  : 단위 Tap 비 증감폭)

그림 6. Nose Curve

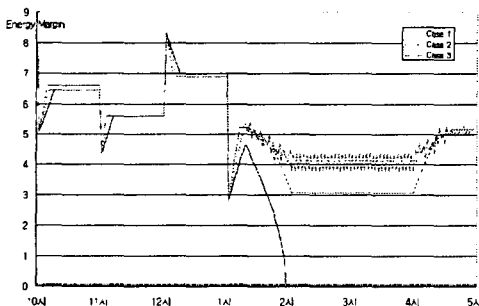


그림 7. Energy Margin

그림 6과 7을 보면 그림 6은 부하의 변화에 따른 전압의 변화를 나타내는 P-V 곡선으로 일반적인 형태와 달리 탭의 고려로 인하여 하나의 부하에서 탭이 다음 탭으로 넘어갈 때까지 전압이 조금씩 계속 변하고 있음을 알 수 있다. 또한  $\Delta a = 0.00652$ 인 경우에 SEP와 UEP가 만나게 되어 그림 7에 의하여 오후 2시인 부하가 가장 크게 되는 순간 전압붕괴가 일어남을 알 수 있고  $\Delta a$ 를 크게 함으로써 부하가 어느정도 커지더라도 전압붕괴가 일어나지 않고 어느정도의 안정 여유도를 가질 수 있음을 그림 7에 의하여 볼 수 있다. 그러나  $\Delta a$ 가 너무 커지면 그림 6의 case 3와 같이 Limit Cycle이 발생할 수 있기 때문에 변압기의 탭이 계속적으로 변하게 되어 변압기의 고장 발생 원인이 될 수 있기 때문에 적절한  $\Delta a$ 를 취하여 주는 것이 중요하다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 변압기 탭영향이 고려된 계통에서 전압 안정도 문제가 어떻게 고려되어야 하는가에 대하여 에너지 함수를 통하여 알아보았다. 변압기의 탭영향을 에너지 함수로 나타낼 수 있게 에너지 함수를 유도하였으며 샘플 시스템과 일부하 곡선을 일례로 들어 부하 변동에 부합하는 적절한 변압기 탭비를 조정함으로써 전압붕괴가 일어나지 않도록 하려면 어떤 조건을 만족해야 하는지를 시뮬레이션 해 봄으로써 갑작스런 부하 변동에도 전압붕괴가 일어나지 않도록 적절한 대처를 할 수 있는 능력을 갖추고자 하였다.

그리고 이번 연구에서는 1기 무한대 모션으로 시뮬레이션 해 보았지만 실제 계통에 직접적으로 적용시켜 보기 위해서는 다양한 모델에 대하여 시뮬레이션 해 볼 필요가 있고 탭 뿐만아니라 그 밖에 커패시터와 같은 이산적인 변화 특성을 갖는 변수에 대해서도 좀 더 고려해 볼 필요가 있을 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Michael S. Branicky, "Stability of Switched and Hybrid Systems", Proceedings of the 33rd Conference on Decision and Control, P.3498-3503, December 1994.
- [2] Michael S. Branicky, "Multiple Lyapunov Functions and Other analysis Tools For Switched and Hybrid Systems", IEEE Transaction on Automatic Control, Vol. 43, No. 4, April 1998
- [3] A. R. Bergen, D. J. Hill, "Structure Preserving Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. Power Application Systems Vol. PAS 100, No. 1, Jan, 1981.
- [4] C. L. DeMarco and T. J. Overbye, "An Energy based security measure for assessing vulnerability to Voltage Collapse", IEEE Trans. on Power Systems Vol. 5, No. 2, May 1990
- [5] T. J. Overbye, M. A. Pai, P. W. Sauer, "Some Aspects of the Energy Function Approach to Angle Voltage Stability Analysis in Power Systems", Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control p.2941-2946 December 1992
- [6] Chen Ching Liu, Khoi T. Vu, "Analysis of Tap-Changer Dynamics and Construction of Voltage Stability Regions", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 36, No. 4, p. 575-590, April 1989
- [7] D. Popovic, I. A. Hiskens, D. J. Hill, "Investigations of Load-tap Changer Interaction", Electrical Power & Energy Systems Vol. 18, No. 2, p.81-97 1996
- [8] Y.-H. Moon, H.-S. Ryu, J.-G. Lee, H.-J. Kook, "Equivalent Mechanical Model of Power Systems for Energy-Based System Analysis", 40th CDC, pp.466-472, Florida, USA, Dec. 2001
- [9] D H Kim, H S Ryu, J-G Lee, Y H Moon, "A Study on Voltage Collapse Mechanism using Equivalent Mechanical Model", KIEE International transactions on Power Engineering, Vol. 12A, No. 1, March 2002