변압기 탭이 반영된 에너지 함수를 이용한 전압안정도 해석

論 文
54A-7-3

Voltage Stability Analysis Based on Energy Function Considering Tap of Transformer

李 基 帝* · 崔 炳 坤** · 權 湧 峻† · 文 永 鉉*** · 吳 龍 澤§ · 李 丙 河§§
(Ki-Je Lee · Byoung-Kon Choi · Yong-Jun Kwon · Young-Hyun Moon · Yong-Taek Oh · Byung-Ha Lee)

Abstract - An energy function is derived on the basis of the EMM(Equivalent Mechanical Model) to take account of the effects of tap changer, and then the VC(Voltage Collapse) criteria is proposed to predict the voltage collapse in power systems. The VC criterion can be evaluated by using the energy margin given by the energy gap between UEP(Unstable Equilibrium Point) and SEP(Stable Equilibrium Point) of the energy function adopted, in which it is noted that the energy contour should be considered due to energy discontinuity associated with tap changing. This paper shows that the proposed VC criterion improves the accuracy of voltage stability analysis with application to a two-bus sample system.

Key Words : 에너지함수, 전압안정도, 변압기 탭, 전압붕괴, 안정여유도, 에너지곡선

1. 서 론

최근 대규모 전력시스템에서의 전압안정 문제가 중대한 관심사로 떠오르고 있다. 거대 전력 계통이 상호 연결 운용된 이래 극단적 전압 저하에 따른 전압붕괴 현상이 자주 나타나고 있다. 이러한 상황에서도 경제적, 환경적 제약으로 인하여 전력설비 확충이 어렵게 됨에 따라 많은 경우 한계 용량에 근접한 상태에서 계통이 운전되고 있는 실정이다.

최근에 발표된 많은 전압붕괴 사고들의 원인은, 전력의 수요가 증가함에 따라 계통의 운전점이 천천히 수 분에서 수 시간 동안에 걸쳐 전압붕괴를 일으키는 곳으로 이동하여, 작은 외란의 누적에 의하여 쉽게 붕괴가 일어나기 때문이다. 이렇게 전압붕괴는 오랜 시간에 걸쳐 일어나기 때문에 계통의 자동 제어뿐만 아니라, 계통을 관리하는 관리자의 수동 제어 또한 필요하다. 따라서 전압붕괴를 효과적으로 대처하기 위해서는 계통의 전압붕괴 근접도 지표가 필수적으로 요구되고 있다.

최근의 많은 논문들이 이러한 지표로서 운전점과 전압붕괴점 사이의 거리를 수량화하여 발표되어졌다. 그 중에 하나가 전압붕괴 근접도 지표로써 에너지함수를 사용하는 것이다.[1~2] 이 방법은 안정 평형점(SEP: Stable Equilibrium Point)과 불안정 평형점(UEP: Unstable Equilibrium Point) 사이의 에너지차를 전압 안전성 지표로 사용하는 것이다. 이러한 에너지함수를 이용한 방법은 그 이론을 에너지함수 직접법을 근간으로 하는데, 이러한 에너지함수 직접법은 계통을 선형화시키는 다른 방법들과 달리 시스템의 비선형성을 그래도 반영시킬 수 있어 보다 정확한 해석이 가능하고, 이에 의한 전압붕괴 근접도 지표는 다른 방법에 의한 전압붕괴 근접도 지표보다 부하의 변화에 대해 선형적으로 추종하여 지표로서의 가치가 높다는 장점이 있다.

전압안정도에 중요한 역할을 하는 인자는 여러 가지가 있으며 SVC나 STATCOM을 고려하여 전압 안정도를 향상시키고자 하는 연구가 다각도로 진행 되어 왔으며[3~5] 또 다른 인자중에 하나는 변압기 탭으로서 기존 방법에서는 연속적인 동작으로 가정하였으나 변압기 탭이 불연속적으로 변하는 이산특성을 직접 반영할 수 없어 최근에는 이산특성을 직접 고려할 수 있는 연구가 진행되고 있다[6~8]. 본 논문에서는 변압기 탭의 이산적인 특성을 그대로 반영한 2모선 계통에 대한 에너지함수를 등가역학모델[9~10](EMM: Equivalent Mechanical Model)을 이용하여 이끌어 내었으며, 제시된 에너지함수가 함수의 시간미분조건을 정확히 만족시키지는 못하지만 근사적으로 만족시킴을 보임으로써 에너지함수로 사용될 수 있음을 보였다. 또한 이렇게 유도된 에너지함수를 이용하여 부하증가모델에 대한 에너지 곡선과 안정 여유도 값을 산출함으로써 본 논문에서 제시한 변압기 탭의 이산특성이 반영된 에너지함수가 전압붕괴 현상을 규명해줄 수 있는 방법임을 보이고자 하며, 전압붕괴 근접도 지표로서 에너지 곡선과 안정 여유도 값이 사용되어질 수 있음을 보이고자 한다.

† 교신저자, 正會員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 博士課程
E-mail : area88sin@hanmail.net
* 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 碩士
** 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 博士
*** 正 會 員 : 延世大 工大 電氣電子工學部 敎授 · 工博
§ 正 會 員 : 한국기술교육대학교 정보기술공학부 교수
§§ 正 會 員 : 인천대학교 전기공학과 교수
接受日字 : 2005年 1月 27日
最終完了 : 2005年 5月 11日

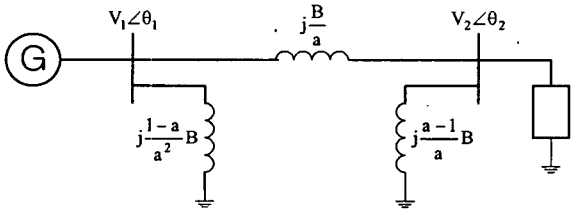
2. 변압기 탭을 고려한 에너지함수

전력계통을 해석하기 위하여 많이 사용되는 역학모델은 전압이 일정하다는 가정 하에서 각 발전기의 관성체가 스프링에 의하여 연결된 모델을 사용하고 있다. 그러나 이러한 모델은 전압이 일정하다는 가정 때문에 실계통 적용에 있어

제약이 따른다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 변화하는 전압을 적절히 반영할 수 있는 새로운 등가역학모델(EMM : Equivalent Mechanical Model)을 사용할 수 있다. 등가역학모델이 기존의 전력계통을 정확히 반영할 수 있음은 [1]에 기술되어져 있다. 이 등가역학모델을 기반으로 얻어지는 역학방정식을 사용하면 계통의 미소에너지 변화량을 구할 수 있으며 미소에너지 변화량을 적분함으로써 계통의 전체 에너지를 구할 수 있다. 이를 바탕으로 전력계통과 같은 비선형 시스템의 해석에 가장 중요한 수단 중의 하나인 Lyapunov 함수의 특성을 갖는 에너지함수를 도출해낼 수 있다. Lyapunov 함수는 임의 기계적 혹은 전기적 시스템의 총 에너지가 계속적으로 소모된다면 그 시스템은 시간이 지남에 따라 결국 어떠한 평형점으로 도달하기 때문에 시스템의 에너지를 나타내는 스칼라 함수를 관찰함으로써 시스템의 안정도를 판별할 수 있다는 개념이다.

2.1 변압기 탭을 고려한 역학적 등가모델

기존의 등가역학모델을 바탕으로 탭을 고려한 등가역학모델을 개발하기 위하여 탭이 포함된 2모선 계통을 π-등가회로로 나타내면 아래 그림과 같다.



V, θ : 각 모선의 전압과 위상각

a : tap ratio

B = $-\frac{1}{X}$ (Z = jX)

그림 1 탭을 포함한 2모선 계통의 π-등가회로

Fig. 1 π-equivalent circuit of 2-bus system including tap changer

위의 그림 1의 등가회로를 그림 2와 같이 등가 역학모델로 나타낼 수 있다.

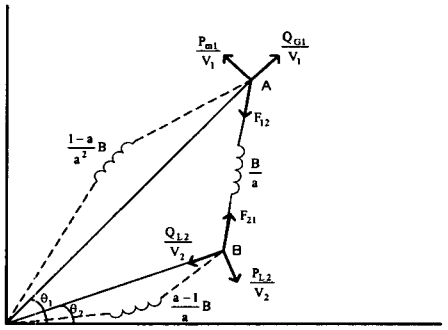


그림 2 탭을 포함한 2모선 계통의 역학적 등가모델

Fig. 2 Equivalent mechanical model(EMM) of 2-bus system including tap changer

그림 2의 A점에서 B점으로 작용하는 탄성력 $\overline{F_{12}}$ 와 B점에서 A점으로 작용하는 탄성력 $\overline{F_{21}}$ 을 $\bar{r}$성분과 $\bar{\theta}$성분으로 분해하여 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.[6]

$$\overline{F_{12}} = -\frac{B}{a}(V_1 - V_2\cos\theta_{12})\hat{r} - \frac{B}{a}V_2\sin\theta_{12}\hat{\theta} \quad (1)$$

$$\overline{F_{21}} = -\frac{B}{a}(V_2 - V_1\cos\theta_{21})\hat{r} - \frac{B}{a}V_1\sin_{21}\hat{\theta} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 이용하여 A점 및 B점에서의 힘의 평형식을 세우면 다음과 같다.

$$\overline{F_1} = \frac{-M_1\ddot{\theta}_1 - D_1\dot{\theta}_1 + P_{m1}}{V_1}\hat{\theta} + \frac{Q_{G1}}{V_1}\hat{r} - \frac{(1-a)B\cdot V_1}{a^2}\hat{r} + \overline{F_{12}} = 0 \quad (3)$$

$$\overline{F_2} = -\frac{P_{L2}}{V_2}\hat{\theta} - \frac{Q_{L2}}{V_2}\hat{r} - \frac{(a-1)B\cdot V_2}{a}\hat{r} + \overline{F_{21}} = 0 \quad (4)$$

계통의 전체 에너지는 그림 2의 역학적 등가모델에서 $\bar{r}$ 방향과 $\bar{\theta}$ 방향의 미소변위변화에 의한 미소에너지 변화량을 적분하여 얻을 수 있으며, i 모선에서의 미소변위의 변화량은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d\overline{V_i} = dV_i\hat{r} + V_i d\theta_i\hat{\theta} \quad (5)$$

따라서 모선 1과 2에서의 에너지의 미소변화량은 각 모선에서 작용하는 모든 힘의 합과 곱으로 나타낼 수 있다.

$$dW_1 = \overline{F_1}\cdot d\overline{V_1} \quad (6)$$

$$dW_2 = \overline{F_2}\cdot d\overline{V_2} \quad (7)$$

위 식을 이용하여 계통전체의 미소에너지 변화량을 구하고 이를 적분하면 아래와 같이 계통 전체의 에너지를 얻을 수 있다.[6]

$$W = \int \sum_{i=1}^{2}\frac{Q_{Gi}-Q_{Li}}{V_i}dV_i + \int\sum_{i=1}^{2}(P_{mi}-P_{Li})d\theta_i - \int\frac{1}{2a^2}BdV_1^2 + \frac{1}{2}\int\sum_{i=1}^{2}\sum_{j\neq i}^{2}\frac{B}{a}d(V_iV_j\cos\theta_{ij}) - \int\frac{B}{2}dV_2^2 - \int M_1\ddot{\theta}d\theta_1 - \int D_1\dot{\theta}_1 d\theta_1 \quad (8)$$

2.2 에너지함수 유도

에너지함수를 유도하기 위해서 우선 앞 절의 식 (8)에서 세번째 항과 네번째 항을 부분적분을 취하고 Lyapunov 함수의 성질을 만족하도록 식을 변형한다. 전체 계통의 에너지의 총합은 항상 0이므로 시간적분 항을 남겨놓고 나머지 항들을 모두 좌변으로 옮기는 형태로 식을 변형하면 아

래와 같은 에너지 함수 E를 얻을 수 있고 이를 통하여 시스템의 안정도를 판별할 수 있게 된다.

$$E=-\int\sum_{i=1}^{2}\frac{Q_{Gi}-Q_{Li}}{V_i}dV_i-\int\sum_{i=1}^{2}(P_{mi}-P_{Li})d\theta_i$$
$$-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\left(\frac{B}{a}V_iV_j\cos\theta_{ij}-\frac{B}{a}V_{io}V_{jo}\cos\theta_{ijo}\right)$$
$$-\frac{B}{2a^2}V_1^2+\frac{B}{2a^2}V_{1o}^2+\frac{1}{2}M_1(w_1^2-w_{1o}^2) \quad (9)$$

또한 함수 E의 시간에 대해 미분은 아래와 같다.

$$\frac{dE}{dt}=-D_1\theta_1^2+\sum_{i=1}^{2}\frac{B}{a^3}V_i^2a-\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j\neq i}^{2}\frac{B}{a^2}V_iV_j\cos\theta_{ij}a \quad (10)$$

전압붕괴가 점진적인 전압강하를 특성으로 갖는다면 탭의 시간에 대한 변화율 $\dot{a}$ 는 0보다 작거나 0이 된다. 또한 식(10)에서 두 번째 항이 세 번째 항보다 우세하므로 식(10)은 항상 0보다 작거나 같아진다고 할 수 있다. 즉, Lyapunov함수의 시간미분조건을 근사적으로 만족시키며, 이러한 근거에서 식(10)의 에너지함수를 전압안정도 해석에 적용할 수 있다.

3. 에너지함수에 의한 전압안정도 해석

에너지함수를 이용한 전압안정도 해석 방법으로는 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 안정 여유도와 에너지 곡선을 이용하여 전압안정도 해석을 하고자 한다. 전압안정도 해석에 앞서 탭의 특성에 관하여 설명하도록 한다.

3.1 탭의 특성에 관한 고찰

탭은 부하단의 전압을 일정하게 유지시켜주는 역할을 한다. 부하양의 증가 등의 요인으로 인하여 탭이 설치되어 있는 모선의 전압이 기준전압에서 허용범위 내에서는 탭이 동작하지 않으며 허용범위를 벗어나게 되면 탭이 작동하게 된다. 이때 탭 동작은 연속적이 아닌 이산적으로 탭비가 증가 또는 감소하게 된다. 그러나 탭은 최소값과 최대값을 가지므로 부하단의 전압이 변함에 따라 계속 변할 수는 없으며 일정범위 내에서만 동작하게 된다. 이러한 특성을 고려하여 탭 동작을 다음과 같이 가정하였다.

- 변압기 탭의 허용범위는 기준전압의 ±20%로 하여 $a^{min}=0.8[pu]$, $a^{max}=1.2[pu]$ 로 한다.
- 기준전압의 허용범위(Dead Band)는 아래 그림과 같다.

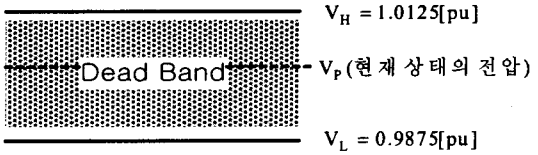


그림 3 기준전압 허용범위
Fig. 3 Dead Band

- 탭 동작 Mechanism은 다음과 같다.

$$a_{k+1}=\begin{cases}a_k+\Delta a & \text{if } V>V_H \text{ and } a_k<a^{max}\\ a_k-\Delta a & \text{if } V<V_L \text{ and } a_k>a^{min}\\ a_k & otherwise\end{cases}$$

3.2 안정 여유도를 이용한 전압안정도 해석

계통의 안정 여유도를 구하기 위해 2장에서 유도한 에너지함수를 이용하여 SEP부터 UEP까지 적분함으로써 안정 여유도에 관한 식 E_{margin}을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$E_{margin}=-\int_{sep}^{uep}\sum_{i=1}^{2}\frac{Q_{Gi}-Q_{Li}}{V_i}dV_i-\frac{B}{2a^2}V_{1uep}^2$$
$$-\int_{sep}^{uep}\sum_{i=1}^{2}(P_{mi}-P_{Li})d\theta_i+\frac{B}{2a^2}V_{1sep}^2$$
$$-\frac{B}{2a}\sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2}\left(V_{iuep}V_{juep}\cos\theta_{ijuep}\right.$$
$$\left.-V_{isep}V_{jsep}\cos\theta_{ijsep}\right)+\frac{1}{2}M_1(w_{1uep}^2-w_{1sep}^2) \quad (11)$$

위의 식(11)을 그림 4와 같은 2모선 계통에 적용시켜보자.

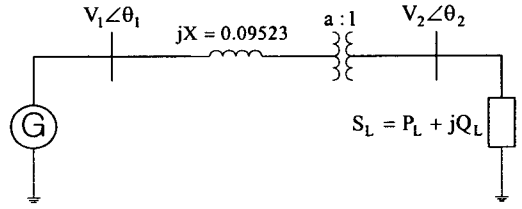


그림 4 2모선 계통(1)
Fig. 4 2-Bus system(1)

그림 4의 계통에서는 발전기모선과 부하모선이 한 개씩 존재하고 탭은 부하단에 존재한다. 또한 발전기모선은 슬랙모선으로 간주하며 부하모선의 기준전압은 1.0이다. 즉, 탭비 a는 부하모선의 전압 V_2를 1.0으로 유지시키기 위하여 동작하게 된다.

WSCC-9모선 데이터에서 2모선만을 취하고 2번 모선의 전압이 1이 되도록 수정한 표 2와 같은 시스템 데이터를 이용하여 조류계산을 하면 그림 5와 같이 V_2에 대한 nose-curve로부터 SEP와 UEP를 얻을 수 있다.

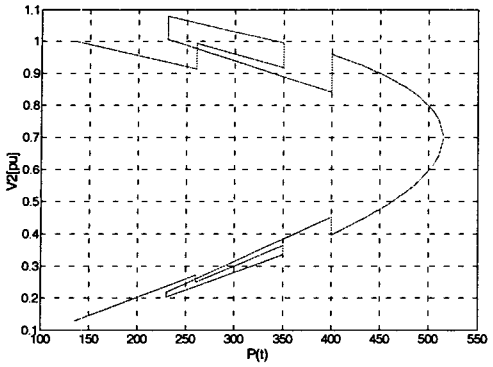


그림 5 탭 동작이 포함된 Nose Curve
Fig. 5 Nose Curve

이렇게 구한 모선전압에 대한 SEP와 UEP 값을 위에서 구한 식 (3-2)에 대입하여 우리가 원하는 안정 여유도 값 (E_{margin})을 구할 수 있다. 이렇게 구한 안정 여유도 값으로 현재 상태의 데이터 값만을 이용하여 현재 계통의 안정 여유도를 알 수 있으므로 이 안정 여유도를 적절한 수준으로 유지시킴으로써 이 후에 계통에 대한 데이터 없이도 계통의 안정도를 유지시킬 수 있게 된다.

3.3 에너지곡선을 이용한 전압안정도 해석

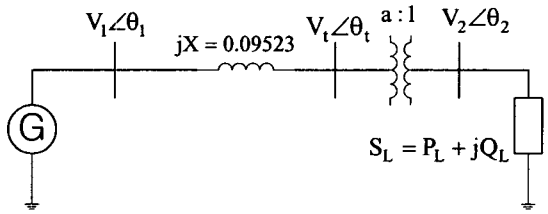


그림 6 2모선 계통(2)
Fig. 6 2-Bus system(2)

그림 6과 같은 2모선 계통에 대하여 식(9)를 이용, 적분 구간을 0부터 SEP까지로 하여 식을 정리하면 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
E=&-\sum_{i=1}^{2}(Q_{Gi}-Q_{Li})(\ln V_{isep}-\ln V_{io})+\frac{B}{2a^2}V_{1sep}^2\\
&-\sum_{i=1}^{2}(P_{mi}-P_{Li})(\theta_{isep}-\theta_{io})-\frac{B}{2a_o^2}V_{1o}^2\\
&-\frac{B}{2a^2}(V_{1sep}V_{tsep}\cos\theta_{12sep}+V_{tsep}V_{1sep}\cos\theta_{21sep})\\
&-\frac{B}{2a_0^2}(V_{1o}V_{t0}\cos\theta_{12o}+V_{t0}V_{1o}\cos\theta_{21o})\\
&-\frac{B}{2}(\frac{V_{tsep}^2}{a}-\frac{V_{t0}^2}{a_o})+\frac{1}{2}M_1(w_{1sep}^2-w_{1o}^2)
\end{aligned}
\qquad (12)
$$

이제 식 (3-3)의 에너지 함수는 변수가 V_t, θ_2인 함수로 바뀌어져 있음을 알 수 있다. 그러므로 부하량을 고려하여 에너지곡선을 그려보면 탭이 고려되었을 때의 부하단에서의 전압특성을 분석할 수 있다. 이미 설명한 바와 같이 탭은 기준전압을 유지하기 위해 동작하며 기준전압의 ±20%의 범위에서 동작하므로 탭비는 V_t의 각 구간에 대하여 아래 표와 같은 값을 갖는다고 가정한다.

표 1. 모선 탭비
Table 1. Tap ratio for 2-bus system

V_t>1.15[pu]	a = 1.2 [pu]
1.05[pu]< V_t≤1.15[pu]	a = 1.1 [pu]
0.95[pu]< V_t≤1.05[pu]	a = 1.0 [pu]
0.85[pu]< V_t≤0.95[pu]	a = 0.9 [pu]
V_t≤0.85[pu]	a = 0.8 [pu]

그림 7에서 부하는 역률 0.8944로 일정하게 고정 시켰으며 일정전력부하로 가정하였고 P_L=3.0[pu], Q_L=1.5[pu]인 경우에 대하여 식(12)를 이용하여 에너지 곡선을 그린 것이다. 이때, 시스템 데이터는 표2와 같으며 초기값들 즉, V_{t0}, θ_{20}, a_o 는 조류계산을 통하여 구해진 계통의 운전점 (operating point)이 된다. (발전기 전압 위상각 θ_1은 영으로 간주하였음)

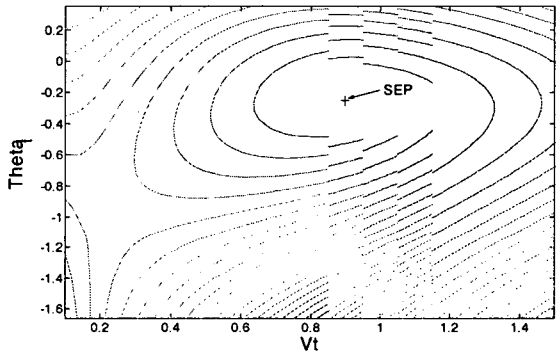


그림 7 탭 동작을 고려한 에너지 곡선
Fig. 7 Energy contour for 2-bus system(2)

그림 7의 경우는 일정전력부하가 증가한 예이다. 부하량이 증가할 때 탭의 작용이 없다면 부하단의 전압은 점점 내려가게 된다. 그러나 이러한 현상은 전압안정도 측면에서 볼 때 바람직한 것이 아니므로 탭은 부하단의 전압을 기준전압으로 유지시키기 위해 동작하게 된다. 그림 7을 살펴보면 그림의 가운데 부분에 오목한 모양을 형성하고 있는 에너지 우물이 존재하는데 이 에너지 우물의 중심이 SEP(안정평형점)가 된다. 또한 그림의 왼쪽에 폐곡선이 끊어지는 점에서 UEP(불안정평형점)가 형성된다.

표 1의 구간별 탭비를 적용시켜보면 그림에서 현재 SEP가 존재하는 구간 즉, 0.85[pu]< V_t≤0.95[pu]인 구간에서 부하단의 전압 V_2 는 탭비 a = 0.9 [pu] 만큼 나누어진 값이므로 전압 V_2가 기준전압으로 유지되고 있음을 알 수 있다. 그러나 부하량이 계속 증가하여 SEP가 왼쪽으로 더 많

이 이동하게 되면 탭의 최소값 0.8[pu] 만으로는 더 이상 부하단의 전압을 기준전압으로 유지시킬 수가 없게 되고 최종적으로는 SEP와 UEP가 합쳐지게 된다. 즉, 전압붕괴 현상이 발생하게 된다.

탭이 고려되지 않았을 경우와의 차이점을 명확히 하기 위하여 그림 8과 비교해 볼 수 있다. 이때 탭이 없다는 사실을 제외한 모든 데이터들은 그림 7의 경우와 같게 주었으며 탭이 존재하지 않으므로 부하단의 전압 V_2 에 대하여 에너지 곡선을 그려 보았다.

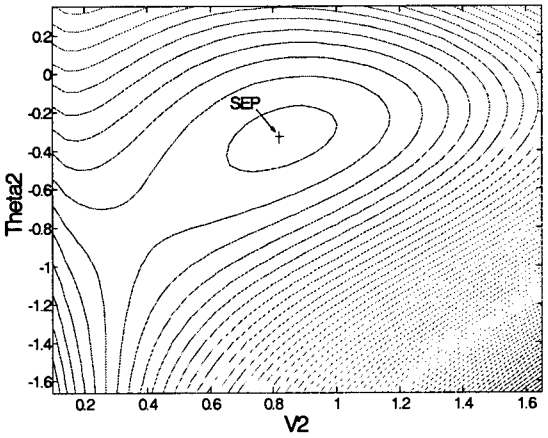


그림 8 탭을 고려하지 않은 에너지 곡선
Fig. 8 Energy contour for 2-bus system without tap changer

그림 7에서와는 다르게 그림 8에서의 SEP는 부하단의 전압 V_2=0.8[pu] 부근에 존재함을 알 수 있다. 또한 등고선을 통하여 유추할 수 있듯이 에너지 우물의 깊이가 그림 7에서 보다 얕아 부하가 조금만 더 증가하여도 우물이 사라지고 SEP와 UEP가 만나게 되어 전압붕괴 현상이 발생할 것이라 예상할 수 있다. 즉, 에너지 곡선에서의 에너지 우물의 깊이와 SEP의 위치를 관찰함으로써 부하에 따른 전압붕괴의 시점을 예상 할 수가 있게 되므로 계통을 운전하고 있는 입장에서는 전압붕괴 이전에 적절한 조처를 취할 수 있게 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과고찰

모의실험은 3장의 그림 4와 그림 6에서 제시한 2모선 계통에 대하여 수행하였다. 실험에 필요한 시스템 데이터는 표 2의 값을 사용하였으며 에너지함수는 식 (11), (12)를 사용하였다.

부하는 일정전력부하로 가정하였으며 부하증가모델은 그림 9와 같이 일 부하로 오전 10시부터 오후 5시까지를 모델링 하였다. 그림 9의 부하증가모델은 하루 중 전력사용이 가장 많은 오후 2시부터 4시 사이와 일과 시간 중 가장 전력사용이 적을 것으로 예상되는 점심시간 등을 고려하였으며 부하의 역률은 일정하다고 가정하였다.

표 2. 2-모선 계통 데이터
Table 2. 2-bus system data

Line Data					
From	To	R	X	Ysh/2	FixedTap
1	2	0.0000	0.0952	0.0000	0.98750

Bus Data							
No.	Type	V	θ	P_g	Q_g	P_L	Q_L
1	S	1.050	0.0	1.8	0.93	0.0	0.0
2	Q	1.000	-0.107	0.0	0.0	120.0	60.0

Per Unit Base[MVA] : 100

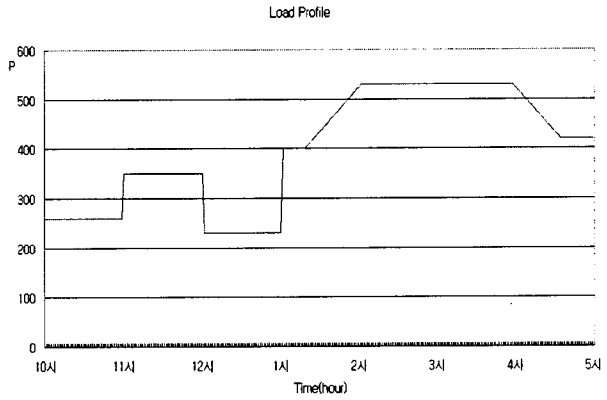


그림 9 부하증가모델
Fig. 9 Load profile

탭 동작 메카니즘은 그림 10의 순서도를 바탕으로 작성하였다. 그림 10에서 t는 순서도의 첫 번째 조건을 만족한 후 현재까지의 시간을 의미하며 T_d는 탭의 동작시간지연(Delay)을 의미한다. 모의실험에서 탭 Delay시간은 120sec로 설정하였다.

4.1 일 부하에 대한 안정도여유도

그림 9의 부하증가모델에 대하여 탭이 존재하지 않을 경우, 탭이 존재할 경우에 대하여 모의실험을 수행하였다.

그림 11은 탭을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 안정여유도를 나타낸다. 탭을 고려하지 않았을 때의 그래프를 보면 점심 시간대의 전력사용의 감소로 비교적 많은 안정여유도를 가지고 있으나 하루 중 전력사용량이 가장 많은 오후 2시 이전에 안정 여유도는 '0'으로서 전압붕괴 현상이 발생하였다. 이러한 전압붕괴는 이미 전력사용량이 비교적 많은 오전 11시부터 12시대의 안정 여유도 약 0.3이하로, Peak 시간대인 오후 2시에서 4시까지 안정적으로 전력을 공급하기에 부족할 것이라는 예상을 할 수 있다.

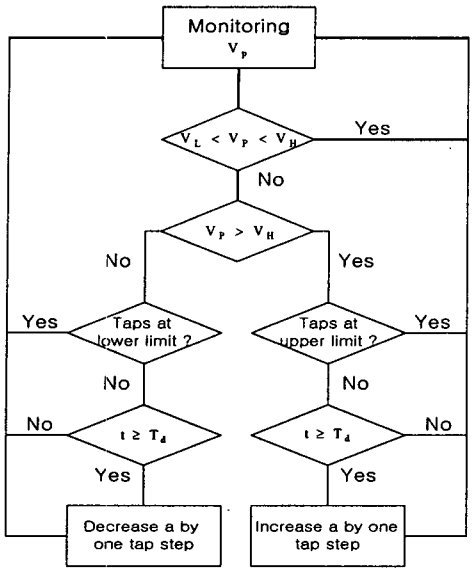


그림 10 탭 동작 메카니즘 순서도

Fig. 10 Tap changer mechanism flow chart

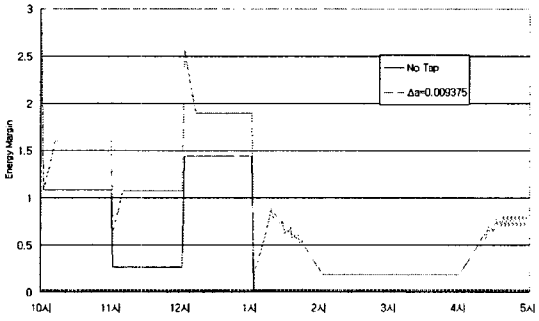


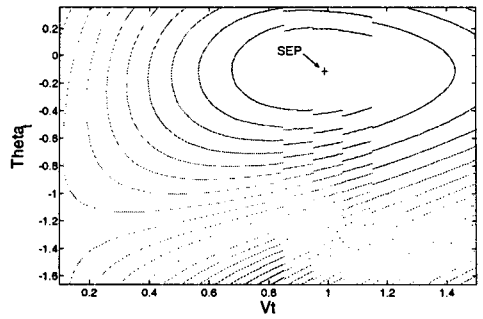
그림 11 탭 존재 유무에 따른 안정여유도

Fig. 11 Energy margin for $\Delta a = 0.009375$ and without tap changer

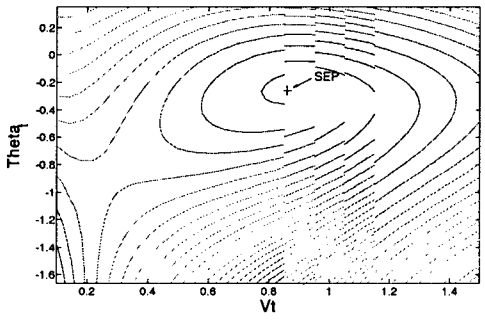
반면, 탭이 존재할 때에는 오전 11시에서 12시사이의 안정여유도 0.5이상, 탭 동작 이후에는 1이상의 값을 가지고 있으나 앞에서 설명했듯이 탭이 존재하지 않을 시에는 약 0.3 정도의 여유도 값만을 가지고 있다. 이상의 모의시험 결과로부터 안정여유도가 갖는 의미를 부하여유도와 연관시켜 해석해볼 수 있다. 즉, 부하증가모델에서 오전 11시에서 12시사이의 부하량이 350[MVA]이고 Peak 부하량이 530[MVA]라는 것을 감안한다면 현재 계통의 안정 여유도가 1이상이라면 이후 부하가 약 1.5배가 증가하더라도 계통의 전압붕괴 현상은 발생하지 않을 것이라 유추할 수 있다.

4.2 일정전력부하를 증가시키는 경우 에너지곡선

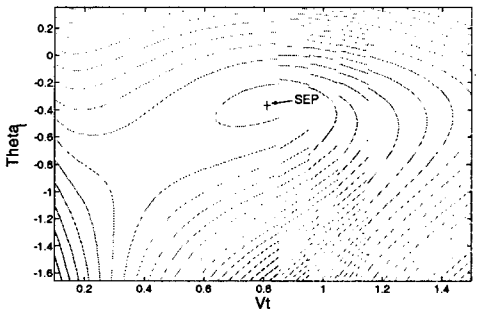
에너지 곡선에 대한 모의실험은 그림 6과 같은 2모선 계통에 대하여 수행하였으며 탭비는 표 1과 같이 가정하였고, 에너식은 식 (12)를 그대로 사용하였다. 또한 부하는 일정역률을 가지는 일정전력부하로 가정하였고 일정전력부하를 증가시키면서 에너지 곡선의 변화를 관찰하였다.



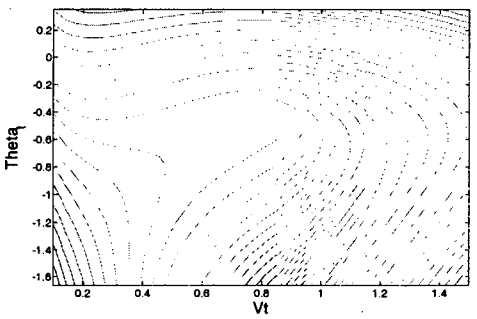
(a) P_L=1.2[pu] , Q_L=0.6[pu]



(b) P_L=3.6[pu] , Q_L=1.8[pu]



(c) P_L=4.8[pu] , Q_L=2.4[pu]



(d) P_L=6.0[pu] , Q_L=3.0[pu]

그림 12 일정전력부하에 대한 에너지곡선

Fig. 12 Energy contour for constant power load

그림 12-a를 보면 계통이 가장 안정적인 모습을 하고 있으며 SEP가 기준전압인 1에 근접해 있음을 관찰할 수 있으며 이점이 계통의 운전점이 된다. 또한 에너지 우물의 깊이

가 깊어 SEP 주변의 폐곡선(등고선)이 많음을 알 수 있다. 그러나 부하가 증가하면서 그림 12-b, c에서 관찰할 수 있듯이 폐곡선의 수는 점점 줄어들게 되어 우물의 깊이는 얕아지고 SEP 또한 그래프의 왼쪽 아래로 이동하면서 계통은 안정한 상태에서 불안정한 상태로 이동하게 된다. 폐곡선의 수가 적다는 것은 또한 SEP와 UEP의 에너지 차이가 적다는 것을 의미하며 이러한 때의 계통은 작은 외란에도 쉽게 전압붕괴가 일어날 수 있게 된다. 결과적으로 모의실험에 사용된 2모선 계통은 그림 12-d에서 볼 수 있듯이 P_L=6.0[pu] , Q_L=3.0[pu]인 부하에서 폐곡선은 사라지고 SEP와 UEP가 만나 전압붕괴가 발생하게 된다. 부하가 증가함에 따른 부하단의 전압은 아래와 같다.

표 3. 부하량에 따른 부하단 전압
Table 3. Load voltage

P_L[pu]	Q_L[pu]	V_2[pu]	θ_2[rad]	V_2[pu]	a[pu]
1.2	0.6	0.98684	-0.11389	0.98684	1
2.4	1.2	0.93947	-0.16538	1.04385	0.9
3.6	1.8	0.85	-0.32	1.0625	0.8
4.8	2.4	0.81053	-0.37154	1.01316	0.8
6.0	3.0	-	-	-	-

위의 표에서도 알 수 있듯이 모든 경우에 대하여 부하단의 전압이 기준전압 부근에서 그 해를 찾을 수 있다. 그러나 부하가 P_L=6.0[pu] , Q_L=3.0[pu]일 때는 더 이상 부하단의 SEP해를 구할 수 없게 된다. 즉, 탭이 한계값에 도달한 상태에서 전압붕괴가 일어남을 의미한다.

지금까지 본 논문에서 제안한 변압기 탭이 포함된 에너지함수의 타당성을 2기 모선에 적용, 모의실험을 통해 검증하였고 오전 10시부터 오후 5시까지의 일 부하에 대하여 본 논문에서 제안한 에너지함수를 이용하여 UEP(불안정 평형점) 에너지와 SEP(안정 평형점) 에너지의 차인 안정여유도 값을 산출함으로써 이 안정여유도 값을 바탕으로 계통의 붕괴까지의 계통의 여유도를 판단할 수 있음을 보였다. 또한 변압기 탭의 이산 특성을 반영한 에너지곡선으로 폐곡선의 개수와 SEP의 위치로서 계통의 전압붕괴 근접정도를 알 수 있음을 보였다.

5. 결 론

전력계통의 안전운행을 위해서는 전압붕괴를 미리예측할 수 있어야하며, 이러한 목적으로 전압 붕괴 근접도 지표가 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 에너지함수를 이용하여 계통의 에너지마진을 전압 붕괴 근접도 지표로 사용할 수 있음을 보였다.

본 논문에서는 변압기 탭을 고려한 에너지함수를 개발하기 위하여 탭이 포함된 전력계통을 역학적 등가 모델로 나타내었고 여기서 변압기 탭은 이산특성을 그대로 반영하였으며 이를 바탕으로 Lyapunov함수 특성을 갖는 에너지함수를 유도하였다. 이렇게 유도된 에너지함수를 이용하여 에너지 곡선을 그려봄으로써 계통의 운전점인 SEP가 기준전압 1 근처에 위치할수록, 에너지 곡선에서 폐곡선의 수가 많을수록 즉, 에너지 우물의 깊이가 깊을수록 계통이 더욱 안정하다는 것을 알 수 있었다. 또한 Nose Curve로 알 수 있듯이 부하단의 SEP와 UEP 전압값을 에너지함수에 대입함으로써 안정 여유도 값을 구할 수 있었으며 이렇게 구한 여유도 값이 계통의 전압 붕괴 근접도 지표로서 사용될 수 있음을 탭이 포함된 2모선 계통에 대한 모의실험을 통하여 확인할 수 있었다. 더욱이 모의실험에서 부하의 단순한 증가가 아닌 일 부하곡선을 모델로 한 부하증가모델을 사용함으로써 더욱 현실에 가까운 전압 붕괴 근접도 지표를 얻고자 하였다.

본 연구에서는 개발된 에너지함수를 2모선계통에 적용하여 그 타당성을 검증하였다. 또한, 실 계통 적용을 위해서는 캐패시터 뱅크와 SVC등 다른 이산특성의 기기들에 대한 반영이 필요하며 추후 연구가 지속되어야 할 부분이다. 그러나 실 계통에 적용하기 위해서는 현재까지 어려운 문제로 남아있는 다기 계통에서 UEP의 계산이 선행 되어야 할 것이다. 최근 BCU방법을 비롯하여 많은 방법들이 개발되고 있으나 근본적으로 Lyapunov 직접법의 보수성(conservativeness)을 해결할 수 있는 획기적인 비선형 시스템 해석방법이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(2003-중-07) 주관으로 수행된 과제임을 알리며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] 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

[2] 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

[3] 이세정, 이병하, 원종률, "반복 조류 계산 기법에 의한 STATCOM 적용 전력시스템의 전압 안정도 향상 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p.146-148, 2001

[4] 주기성, 김진오, "SVC 제어기에 의한 전압안정도 향상과 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, p.1308-1310, 1999

[5] 김재현, 김양일, 기경현, 정성원, "STATCOM을 이용한 전력계통의 전압안정도 향상방안에 관한 연구", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, p.255-258, 2003

[6] Juraj Medanic, "Discrete Models of Slow Voltage Dynamics for Under Load Tap-Changing Transformer Coordination", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.PWRS-2, No.4, pp.873-881, November 1987

[7] Chen Ching Liu, Khoi T. Vu, "Analysis of

Tap-Changer Dynamics and Contruction of Voltage Stability Regions", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol. 36, No. 4, p. 575-590, April 1989

[8] 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

[9] 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, p.466-472, Florida, USA, Dec. 2001

[10] D-H Kim, H-S Ryu, J-G Lee, Y-H Moon, "A Study on Voltage Collapse Mechanism using Equivalent Mechnical Model", KIEE International transactions on Power Engineering, Vol. 12A, No. 1, March 2002

[11] Young-Hyun Moon, "A New Approach to derive Energy Integral for the Direct Method of Stability Analysis in Multimachine Power Systems", IEEE 36th Midwest Symposium on Circuits and Systems, August 1993

저 자 소 개

이 기 제(李 基 帝)

1976년 11월 29일생. 2003년 수원대학교 전기공학과 졸업. 2005년 연세대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 삼성중공업에 근무중.

E-mail : kjlee7611@hotmail.net

최 병 곤(崔 炳 坤)

1994년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 2000년~2003년 LG-CNS 근무. 2004년~현재 Cornell 대학에서 Post-Doc 수행중.

E-mail : logic_tree@hanmail.net

권 용 준 (權 湧 峻)

1976년 10월 10일생. 1999년 연세대학교 전기공학과 졸업. 2001년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정 진행중.

E-mail : area88sin@hanmail.net

문 영 현(文 永 鉉)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1978년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 Oregon State Univ. 대학원 졸업(공박). 1983년~현재 연세대학교 전기전자공학부 교수.

E-mail : moon@yonsei.ac.kr

오 용 택(吳 龍 澤)

1958년 6월 17일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1991년 한전 정보처리처 과장. 1991년~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 교수.

E-mail : ytoh@kut.ac.kr

이 병 하(李 丙 河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1979년~1994년 한전기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.

Tel : 032-770-8437

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr