

부하의 증가 패턴을 고려한 전압 안정도 직접 해석에 관한 연구

문 영현*, 최 병곤**, 노 태훈*, 이 응혁*

*연세대학교 전기공학과

A Study on the Voltage Stability Direct Analysis reflecting Load Increase Pattern

Y.H. Moon*, B.K. Choi**, T.H. Roh*, E.H. Lee*

*Dept. of Electrical Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea

Abstract

This paper develops a method for reliably estimating an UEP(Unstable Equilibrium Point) which is located in the direction of SEP(Stable Equilibrium Point)'s moving as system load is getting heavy. As power systems are getting loaded heavily, the SEP which is an operable solution, and the UEP which is occurring voltage collapse, are moving toward each other linearly. The estimated UEP is used as a good initial guess for the real UEP. The proposed method is tested by 3 bus system and Stagg 5 bus system. It is demonstrated that the proposed method is very useful for assessing system voltage stability in the case of heavy loaded power system. The result solutions are often used in conjunction with energy methods and the stability margin.

1. 서론

최근 전력공급의 안정성과 관련하여 특히 문제가 되고 있는 분야가 전압 안정도 해석이며 특히, 1987년 7월 동경에서 전압 붕괴에 따른 대정전 사고 이후 국제적으로 비상한 관심이 이 분야에 모아지고 있다. 일반적으로 전압 붕괴 현상은 부하의 증가와 밀접한 관련을 가지고 있으며, 전압 안정도 해석에 있어서 문제가 되는 것은 현재 운전 상태가 전압 붕괴 점으로부터 얼마나 안정한 상태에 있는가를 판단하는 것이다. 따라서 직접 전압 안정도 해석에 있어 정확한 안정도 마진(stability margin) 및 전압붕괴근접도지표(VCPPI : Voltage Collapse Proximity Index)의 산출이 필수적이다. 정량적인 안정도 마진을 산출하는 방법으로 에너지함수에 의한 전압 안정도 직접 해석법이 있으며[1][2][3], 선형화 된 방정식을 사용하는 여타의 해석법과는 달리 시스템의 비선형성을 그대로 반영시킬 수 있어 정확한 해석이 가능하다. 그러나 공존하는 많은 시스템의 불안정평형점 중에서 안정도 마진 산출에 필요한 정확한 불안정평형점 선정하는 문제는 많은 연구에도 불구하고 극도의 계산을 요구하는 등 아직 어려운 문제로 남아 있다. 이것은 많은 불안정평형점들 중에서 부하의 증가에 의해 전압붕괴를 일으키는 불안정평형점이 모선 별 부하의 증가 패턴과 밀접한 관련을 갖고 있기 때문이다[4].

본 논문에서는 부하의 증가 패턴을 고려하여 에너지함수를 이용, 중부하 시 부하 증가에 의해 전압 붕괴를 일으키게 되는

하나의 불안정평형점(UEP) 만을 효과적으로 추정하는 새로운 알고리즘을 제시하고, 이를 3 모선 및 Stagg 5 모선 계통에 적용하여 그 타당성을 검증한다.

2. 부하 증가 패턴을 고려한 UEP의 추정

경부하 상태의 n 모선 계통에서 불안정 평형점은 일반적으로 2^{n-1} 개 존재하며[5][9], 부하가 증가함에 따라 이 중에서 하나가 최종적으로 하나의 안정 평형점과 겹쳐지고, 이 때 전압 붕괴가 발생하게 된다. 조류계산 방정식(load flow equation)을 만족하는 해의 집합 즉, 계통 운전점인 안정평형점(SEP) 및 불안정평형점들(UEP's)을 모두 구하기는 어려움이 많으며 지금까지 여러 가지 방법들이 소개되었으나, 대부분 많은 계산량을 요구하고 있다. 따라서 조류계산방정식의 모든 해를 구하기 보다는 부하의 증가 패턴을 고려, 안정평형점의 이동 방향에 있는 몇 개의 불안정평형점을 구하는 것이 효율적인 방법이라고 할 수 있으며 빠른 계산 시간 및 신속한 대응책을 요하는 중부하 상태에서는 본 논문에서 제시하는 방법이 매우 효과적이라 할 수 있다.

본 논문에서 고려하는 다 모선 샘플 계통에서는 수식의 복잡성을 피하기 위해 조속기를 고정시키고 여자기 제어 영향을 무시하도록 한다. 선로 저항을 고려하지 않고, 부하의 전압 의존성을 고려하지 않는다고 가정하면, n 모선 계통의 에너지 함수는 아래와 같다.

$$E = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^m \left[\frac{1}{2} B_i V_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m V_j V_i B_{ij} \cos \theta_{ij} \right]_{(0, V_i)}^{(0, V_i)} - \sum_{i=1}^m \int_{\theta_{i0}}^{\theta_i} P_m d\theta_i - \sum_{i=1}^m \int_{V_{i0}}^{V_i} \frac{Q_{GL}}{V_i} dV_i + \sum_{i=1}^m \int_{\theta_{i0}}^{\theta_i} P_{Li} d\theta_i + \sum_{i=1}^m \int_{V_{i0}}^{V_i} \frac{Q_{Li}}{V_i} dV_i \quad (2.1)$$

(단, 모선 번호가 m 보다 작거나 같은 모선은 발전기 모선임) 어느 특정 부하 P_{Li} 및 Q_{Li} 에서의 평형점(EP)은 에너지 함수(2.1)를 V_i, θ_i 에 관해 각각 편미분한 식을 zero로 놓았을 때의 연립방정식의 해로 구할 수 있다. 이는 에너지 함수를 V_i, θ_i 에 관해 각각 편미분한 식이 조류계산방정식(load flow equation)과 같음을 이용한 것이다.

$$\frac{\partial E_i}{\partial \theta_i} = P_{m_i} - P_{L_i} - \sum_{j=1}^m V_j V_i B_{ij} \sin \theta_{ij} = 0 \quad (2.2a)$$

$$\frac{\partial E_L}{\partial V_i} = Q_{G1} - Q_{L1} + \sum_{j=1}^n V_j V_i B_{ij} \cos \theta_{ij} + \sum_{j=1}^n B_{ij} V_j^2 = 0 \quad (2.2b)$$

계통 부하가 미소 증가하게 되면 계통의 운전점도 변화하게 되어 불안정평형점과 더욱 가까와 지게 된다. 우선 부하의 미소 증가에 따른 안정평형점의 이동 방향 벡터를 구하기 위하여 부하 증가 패턴 벡터 \vec{d} 를 도입하여 부하를 증가시킬 수 있다. $P_{L0}=[P_{L10} \ P_{L20} \ \dots \ P_{L10} \ \dots \ P_{L10}]$, $Q_{L0}=[Q_{L10} \ Q_{L20} \ \dots \ Q_{L10} \ \dots \ Q_{L10}]$ 에서의 안정평형점을 X_{sep}^0 라 하면 조류계산방정식 (2.2) 는 다음과 같이 일반적으로 쓸 수 있다.

$$f(x) = y \quad (2.3)$$

$$\text{단, } x = [\theta, V]^T, \quad y = [P_{L0}, Q_{L0}]$$

부하가 증가 패턴 벡터 \vec{d} 방향으로의 미소 변화하면 식(2.3) 은 다음과 같다.

$$f(X_0 + \Delta X) = y_0 + \Delta \alpha d \quad (2.4)$$

단, $\Delta \alpha$ 는 미소 변화 비율

여기서 ΔX 는 근사적으로 Taylor 급수로 전개하여 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta X \cong \Delta \alpha J^{-1} d \quad (2.5)$$

단, $J = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x=X_0}$, 자코비안 행렬

따라서 식(2.5)으로부터 부하가 \vec{d} 의 방향으로 미소 변화 하였을 때 X_0 의 이동 방향 벡터 \vec{y} 를 구할 수 있다.

$$\vec{y} = \frac{\frac{\partial X}{\partial \alpha}}{\left\| \frac{\partial X}{\partial \alpha} \right\|} = \frac{J^{-1} d}{\left\| J^{-1} d \right\|} \quad (2.6)$$

부하가 증가함에 전압 붕괴를 유발하는 불안정평형점은 부하 증가에 따른 안정평형점의 이동 방향의 부근에 위치 하게 되어 근사적으로 불안정평형점을 구할 수 있다. 부하가 P_{L0} , Q_{L0} 일 때의 불안정 평형점은 근사적으로 다음과 같다.

$$X_{sep}^{estimated} \cong X_{sep}^0 + \lambda^* \times \vec{y} \quad (2.7)$$

식 (2.7)에서 λ^* 는 다음 조건을 만족하는 최적 상수이다.

$$\lambda^* = \min \left\{ \lambda_i \mid \frac{\partial E(X_{sep}^0 + \lambda_i \times \vec{y})}{\partial \lambda} = 0 \text{ and } \lambda_i > 0 \right\} \quad (2.8)$$

식 (2.8)에서 구한 $X_{sep}^{estimated}$ 에너지 함수에서 벡터 \vec{y} 방향으로의 첫 번째 능선에 해당하는 점을 가리킨다. 식(2.8)에서 에너지함수를 λ 에 대해 편미분한 식을 n 모선에 대해 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial E(X_{sep}^0 + \lambda \vec{y})}{\partial \lambda} = \sum_{i=1}^n \left[\beta_i (V_0 + \lambda \gamma_{vi}) \gamma_{vi} + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left[2\gamma_{vi} \gamma_{vj} + V_j^2 \beta_{ij} \cos(\theta_{ij} + \lambda \gamma_{ij}) \right] - \gamma_{ij} (V_0 + \lambda \gamma_{vi}) \gamma_{vj} + \lambda \gamma_{vj} \right] \beta_{ij} \sin(\theta_{ij} + \lambda \gamma_{ij}) \Big] + \sum_{i=1}^n P_{Li} \gamma_{vi} + \sum_{i=1}^n Q_{Li} \left(\frac{\gamma_{vi}}{V_0 + \lambda \gamma_{vi}} \right) - \sum_{i=1}^n P_{mi} \gamma_{vi} - \sum_{i=1}^n Q_{mi} \left(\frac{\gamma_{vi}}{V_0 + \lambda \gamma_{vi}} \right) = 0 \quad (2.9)$$

여기서 γ_{vi} : 벡터 \vec{y} 의 V_i 성분

$$\gamma_{0ij} = \gamma_{0i} - \gamma_{0j}$$

식(2.9)는 단일 변수 λ 에 관한 비선형 방정식으로, 식(2.8) 을 만족하는 λ 를 구하여 식 (2.7)에 의해 $X_{sep}^{estimated}$ 를 구할 수 있다.

3. 샘플 계통 적용 및 결과 고찰

3.1.3-모선에 대한 적용

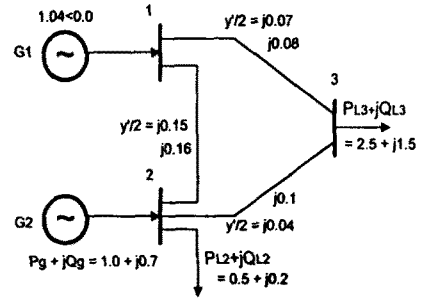


그림 3.1 2기 3모선 계통도

Fig. 3.1 2-machine 3 bus system

본 논문에서는 2기 모선의 부하가 일정한 비율로 증가하는 간단한 부하 증가 패턴 시나리오를 적용하여 보았다. 부하 상수 (load constant) K를 정의 하고, K=1 일 때 base case 로서 초기 부하를 나타내도록 하였다. 그림 3.1에서 볼 수 있듯이, 모선 2 의 부하보다 모선 3의 부하가 상대적으로 큼을 알 수 있다.

표 3.1 부하 증가에 따른 SEP, UEP
Table 3.1 SEP, UEP Data according to the load change

부하 상수 K	SEP				UEP			
	θ_2	θ_3	V_2	V_3	θ_2	θ_3	V_2	V_3
1.00	-0.0518	-0.1429	1.0332	0.9506	-0.0607	-0.8451	0.5568	0.1959
1.30	-0.0965	-0.2009	0.9054	0.9069	-0.1485	-0.7985	0.5898	0.2699
1.40	-0.1126	-0.2351	0.9805	0.8861	-0.1738	-0.7794	0.6033	0.2978
1.50	-0.1294	-0.2624	0.9638	0.8629	-0.1969	-0.7579	0.6185	0.3281
1.60	-0.1473	-0.2924	0.9450	0.8366	-0.2175	-0.7333	0.6360	0.3614
1.70	-0.1666	-0.3265	0.9230	0.8058	-0.2353	-0.7041	0.6568	0.3992
1.75	-0.1770	-0.3458	0.9103	0.7880	-0.2429	-0.6871	0.6690	0.4206
1.80	-0.1881	-0.3674	0.8959	0.7677	-0.2494	-0.6679	0.6829	0.4444
1.85	-0.2002	-0.3923	0.8791	0.7438	-0.2546	-0.6452	0.6993	0.4718
1.90	-0.2140	-0.4229	0.8581	0.7137	-0.2577	-0.6186	0.7199	0.5055
1.95	-0.2318	-0.4603	0.8284	0.6678	-0.2585	-0.5732	0.7513	0.5550
1.98	-0.2368	-0.4832	0.8158	0.6523	-0.2548	-0.5587	0.7617	0.5711
1.97	-0.2451	-0.5114	0.7958	0.6226	-0.2498	-0.5309	0.7617	0.6016
1.9706	-0.2479	-0.5195	0.7890	0.6139	-0.2479	-0.5228	0.7678	0.6104
1.9708	-0.2488	-0.5208	0.7849	0.6063	-0.2488	-0.5208	0.7649	0.6063

표 3.2 부하 증가에 따른 불안정평형점의 추정 값
Table 3.2 The estimated UEP with increasing load

부하 상수 K	UEP				Estimated UEP ($X_{sep}^{estimated}$)			
	θ_2	θ_3	V_2	V_3	θ_2	θ_3	V_2	V_3
1.00	-0.0607	-0.8451	0.5568	0.1959	-0.7030	-1.1678	0.5430	0.2215
1.30	-0.1485	-0.7985	0.5898	0.2699	-0.5984	-0.9682	0.5400	0.2733
1.40	-0.1738	-0.7794	0.6033	0.2978	-0.5545	-0.9380	0.5571	0.2967
1.50	-0.1969	-0.7579	0.6185	0.3281	-0.5061	-0.8980	0.5786	0.3253
1.60	-0.2175	-0.7333	0.6360	0.3614	-0.4651	-0.8352	0.6002	0.3547
1.70	-0.2353	-0.7041	0.6568	0.3992	-0.4145	-0.7783	0.6282	0.3918
1.75	-0.2429	-0.6871	0.6690	0.4206	-0.3899	-0.7481	0.6435	0.4120
1.80	-0.2494	-0.6679	0.6829	0.4444	-0.3633	-0.7157	0.6622	0.4368
1.85	-0.2546	-0.6452	0.6993	0.4718	-0.3343	-0.6767	0.6854	0.4679
1.90	-0.2577	-0.6186	0.7199	0.5055	-0.3037	-0.6326	0.7126	0.5049
1.95	-0.2585	-0.5732	0.7513	0.5550	-0.2675	-0.5700	0.7545	0.5628
1.98	-0.2548	-0.5587	0.7617	0.5711	-0.2606	-0.5596	0.7605	0.5712
1.97	-0.2498	-0.5309	0.7617	0.6016	-0.2498	-0.5294	0.7626	0.6033
1.9706	-0.2479	-0.5228	0.7678	0.6104	-0.2479	-0.5227	0.7677	0.6105
1.9708	-0.2488	-0.5208	0.7649	0.6063	-0.2488	-0.5208	0.7649	0.6073

표 3.1 에서 볼 수 있듯이 부하 상수 $K=1.9708$ 일 때 거의 전압 붕괴가 일어나고 있음을 알 수 있다. 표 3.1 의 불안정평형점들은 자코비안 행렬의 고유치(eigenvalue)중 단 하나만 음의 값을 갖는 type-I UEP 이다. 표 3.2 는 2 장에서 제시한 알고리즘을 이용하여 부하 증가 패턴에 대한 불안정평형점의 추정 값이다.

추정된 불안정평형점의 전압의 크기는 부하가 증가함에 따라 실제 UEP 값에 접근함을 볼 수 있다. 또한 전압 붕괴가 일어나는 중부하 모선인 모선 3 의 전압 위상각도 실제 값에 빨리 접근함을 발견하였다. 이것은 부하가 중부하 상태로 친이함에 따라 안정 평형점의 이동 방향에 더 가까이 위치하게 된다는 것을 입증하는 것이고, 본 논문에서 제시한 알고리즘이 계통의 중부하 상태에서 실제 불안정평형점을 잘 추정하고 있음을 보인 것이다. 또한 이 추정값을 조류계산의 새로운 초기치로 했을 때의 결과가 실제 UEP 값에 훌륭하게 수렴하므로(표 3.3 참조) 본 알고리즘으로 얻은 추정치는 정확한 UEP 값을 얻기 위한 훌륭한 초기치로 활용성이 클 것으로 사려 된다. 위에서 얻은 추정된 불안정평형점을 조류계산의 새로운 초기치로 하여 그 수렴 값을 관찰하였다. 이러한 방법은 추정된 값이 실제 정확한 불안정평형점에 매우 근접하고 있다는 사실에 근거를 두고 있다.

표 3.1 과 표 3.2 를 관찰해 보면 중부하 모선에서의 추정된 전압과 위상각은 실제 값과 많은 차이를 보이며 오히려 실제 안정평형점에서의 전압과 위상각에 가까움을 알 수 있다. 이런 점을 고려하여 새로운 초기치를 구성할 수 있는데, 그 초기치를 X_{UEP}^{cl} 를 라하고 다음과 같이 구성하라.

$$X_{UEP}^{cl} = [\theta_{2sep}, \theta_{3sep}^{estimated}, V_{2sep}, V_{3sep}^{estimated}] \quad (2.10)$$

X_{UEP}^{cl} 을 초기 치로 했을 때 조류계산 결과는 표 3.3 과 같고, 표 3.2 와 비교해 볼 때 실제 불안정평형점에 잘 수렴함을 볼 수 있다. Stagg 5 모선 계통 적용시에는 X_{UEP}^{cl} 를 $X_{UEP}^{estimated}$ 로 대체하기로 한다.

표 3.3. X_{UEP}^{cl} 을 초기치로 했을 때의 조류계산 결과

Table 3.3 Load flow results when X_{UEP}^{cl} is given as an initial point

부하 상수 K	X_{UEP}^{cl} 이 초기치일 때 조류계산 결과			
	θ_2	θ_3	V_2	V_3
1.00	-0.0607	-0.8451	0.5568	0.1959
1.30	-0.1485	-0.7985	0.5898	0.2699
1.40	-0.1738	-0.7794	0.6033	0.2678
1.50	-0.1969	-0.7579	0.6185	0.3281
1.60	-0.2175	-0.7333	0.6360	0.3614
1.70	-0.2353	-0.7041	0.6568	0.3992
1.75	-0.2429	-0.6871	0.6690	0.4206
1.80	-0.2494	-0.6679	0.6829	0.4444
1.85	-0.2546	-0.6452	0.6993	0.4718
1.90	-0.2577	-0.6186	0.7199	0.5055
1.95	-0.2565	-0.5732	0.7513	0.5550
1.96	-0.2548	-0.5567	0.7617	0.5712
1.97	-0.2498	-0.5309	0.7817	0.6016
1.9708	-0.2475	-0.5212	0.7888	0.6121
1.9708	-0.2468	-0.5206	0.7894	0.6109

3.2 Stagg 5 모선 적용 및 고찰

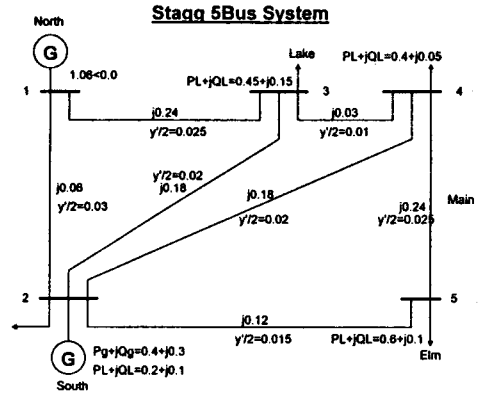


그림 3.2 Stagg 5 모선 계통도
Fig. 3.2 Stagg 5 Bus System

그림 3.2 의 샘플 계통에 2 장에서 제시한 방법을 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다. 3.1 절에서와 같이 각 모선의 부하는 일정한 비율로 증가시켰다. 우선 부하의 증가에 따른 안정평형점은 표 3.4 와 같다. $K=2.99$ 일 때는 전압 붕괴점과 매우 근접한 상태이다.

표 3.4 부하 증가에 따른 Stagg 5 모선 안정평형점
Table 3.4 SEP's of Stagg 5 Bus System with increasing K

Stable Equilibrium Point								
K	v2	v3	v4	v5	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
1.000	1.0320	1.0110	1.0117	1.0072	-0.1126	-0.1917	-0.2037	-0.2358
1.600	1.0030	0.9722	0.9723	0.9641	-0.1567	-0.2651	-0.2823	-0.3287
2.000	0.9775	0.9384	0.9379	0.9262	-0.1888	-0.3212	-0.3427	-0.4010
2.400	0.9433	0.8934	0.8921	0.8753	-0.2250	-0.3877	-0.4148	-0.4893
2.800	0.9204	0.8632	0.8614	0.8408	-0.2458	-0.4284	-0.4593	-0.5451
2.800	0.8889	0.8218	0.8190	0.7928	-0.2703	-0.4801	-0.5163	-0.6185
2.900	0.8654	0.7908	0.7873	0.7564	-0.2859	-0.5160	-0.5562	-0.6719
2.940	0.8520	0.7731	0.7691	0.7352	-0.2938	-0.5356	-0.5782	-0.7022
2.960	0.8430	0.7613	0.7570	0.7209	-0.2986	-0.5482	-0.5925	-0.7223
2.980	0.8290	0.7427	0.7379	0.6983	-0.3055	-0.5675	-0.6144	-0.7538
2.984	0.8258	0.7386	0.7336	0.6932	-0.3070	-0.5717	-0.6192	-0.7608
2.986	0.8233	0.7352	0.7301	0.6890	-0.3081	-0.5751	-0.6231	-0.7666
2.988	0.8200	0.7308	0.7256	0.6835	-0.3095	-0.5794	-0.6281	-0.7741
2.989	0.8176	0.7277	0.7224	0.6796	-0.3105	-0.5825	-0.6317	-0.7794
2.990	0.8128	0.7213	0.7157	0.6716	-0.3125	-0.5888	-0.6389	-0.7903

표 3.5 부하 증가에 따른 Stagg 5 모선 추정 불안정평형점

Table 3.5 $X_{UEP}^{estimated}$ of Stagg 5 Bus System with increasing K

Estimated Unstable Equilibrium Point ($X_{UEP}^{estimated}$)								
K	v2	v3	v4	v5	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5
1.000	1.0320	1.0110	1.0117	1.0001	-0.1126	-0.1917	-0.2037	-2.5834
1.600	1.0030	0.9722	0.9723	0.0001	-0.1567	-0.2652	-0.2823	-2.2640
2.000	0.9775	0.9384	0.9379	0.0106	-0.1888	-0.3218	-0.3427	-2.0718
2.400	0.9433	0.8934	0.8921	0.1044	-0.2250	-0.3877	-0.4148	-1.7675
2.800	0.9204	0.8632	0.8614	0.1997	-0.2458	-0.4284	-0.4593	-1.5555
2.800	0.8889	0.8218	0.8190	0.3457	-0.2703	-0.4801	-0.5163	-1.2846
2.900	0.8654	0.7909	0.7874	0.4552	-0.2859	-0.5160	-0.5562	-1.1056
2.940	0.8520	0.7731	0.7691	0.5152	-0.2938	-0.5356	-0.5782	-1.0137
2.980	0.8290	0.7427	0.7379	0.6100	-0.3055	-0.5675	-0.6144	-0.8758
2.984	0.8259	0.7386	0.7336	0.6221	-0.3070	-0.5717	-0.6192	-0.8588
2.986	0.8233	0.7352	0.7301	0.6319	-0.3081	-0.5751	-0.6231	-0.8450
2.988	0.8200	0.7308	0.7256	0.6449	-0.3096	-0.5795	-0.6281	-0.8270
2.989	0.8176	0.7277	0.7224	0.6502	-0.3105	-0.5825	-0.6317	-0.8196
2.990	0.8128	0.7213	0.7157	0.6671	-0.3125	-0.5888	-0.6389	-0.7965
2.990	0.8123	0.7207	0.7151	0.6689	-0.3127	-0.5894	-0.6396	-0.7940

표 3.5는 추정된 UEP를 나타낸다. 모선 5의 전압과 위상각을 제외한 나머지 모선이 추정값인 SEP의 값으로 대처하였다. 이는 상대적으로 경부하인 모선의 추정값보다 SEP의 값이 실제 UEP값에 오히려 더 가깝기 때문이다. 특히 조류계산은 위상각에 매우 민감하므로 추정 UEP를 새로운 초기치로 하여 정확한 조류계산결과를 얻기 위해서는 이러한 과정이 필요하다고 하겠다.

표 3.5의 값을 이용하여 표 3.6과 같은 불안정평형점을 얻었다. 이 불안정평형점에서 자코비안행렬은 한 개의 negative 고유치(eigen value)를 갖으며, 이는 Type-I UEP임을 알 수 있다.

표 3.6 $X_{uep}^{estimated}$ 를 초기치로 했을 때 조류계산 결과

Table 3.6 Load flow results with initial value, $X_{uep}^{estimated}$

X _{uep} ^{estimated} 를 초기치로 했을 때 조류계산 결과									
K	v2	v3	v4	v5	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	
1.000	0.6719	0.5915	0.5469	0.1692	-0.1627	-0.3836	-0.4356	-1.3777	
1.600	0.6623	0.5591	0.5239	0.2443	-0.2277	-0.5303	-0.6013	-1.3320	
2.000	0.6628	0.5432	0.5164	0.3129	-0.2717	-0.6267	-0.7073	-1.2621	
2.400	0.6817	0.5542	0.5361	0.4040	-0.3087	-0.6866	-0.7671	-1.1466	
2.600	0.7019	0.5770	0.5629	0.4597	-0.3212	-0.6913	-0.7669	-1.0726	
2.800	0.7332	0.6165	0.6059	0.5284	-0.3278	-0.6743	-0.7421	-0.9816	
2.900	0.7573	0.6480	0.6393	0.5749	-0.3270	-0.6527	-0.7147	-0.9200	
2.940	0.7711	0.6662	0.6584	0.6000	-0.3248	-0.6383	-0.6971	-0.8666	
2.960	0.7803	0.6783	0.6711	0.6162	-0.3229	-0.6281	-0.6850	-0.8650	
2.980	0.7945	0.6971	0.6907	0.6409	-0.3189	-0.6115	-0.6653	-0.8319	
2.984	0.7977	0.7013	0.6951	0.6463	-0.3179	-0.6076	-0.6608	-0.8247	
2.986	0.8003	0.7047	0.6986	0.6507	-0.3171	-0.6045	-0.6571	-0.8187	
2.988	0.8036	0.7092	0.7032	0.6563	-0.3159	-0.6003	-0.6523	-0.8111	
2.989	0.8060	0.7123	0.7064	0.6603	-0.3151	-0.5974	-0.6488	-0.8057	
2.990	0.8108	0.7187	0.7131	0.6684	-0.3132	-0.5912	-0.6417	-0.7947	

위의 표 3.5, 표 3.6을 비교해 볼 때 경부하 상태에서는 추정값과 실제 값 사이의 오차가 비교적 큼에도 불구하고 실제값으로 잘 수렴한다는 것을 알 수 있으며, 이는 매우 흥미 있는 결과라 하겠다. 그리고 경부하 상태에서 전압강도 해석법, 조류계산 자코비안 행렬법 등 여타 전압안정도 해석 방법을 병행한다면 경부하 시의 추정오차로 인한 부정확한 안정도 판별을 쉽게 보완할 수 있다고 본다.

계통이 중부하 상태로 천이함에 따라 비교적 정확한 추정값을 얻을 수 있었고, 이 추정값을 조류계산의 초기치로 사용했을 때 실제 불안정평형점에 훌륭히 수렴함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법은 매우 정확한 안정여유도가 요구되는 중부하 시 계통의 부하 증가에 따른 전압붕괴점을 예측하고 전압붕괴를 유발하는 UEP의 계속적인 관찰 및 정확한 계통 안정여유도(stability margin) 산출에 효과적으로 적용될 수 있다고 본다.

4 결론

본 논문에서는 부하의 증가 패턴을 고려하여 전압 안정도 직접 해석법에서 문제가 되고 있는 불안정 평형점을 찾는 새로운 알고리즘을 제시하였다. 부하의 증가 패턴에 따른 안정평형점(SEP)의 이동 방향에 있는 하나의 불안정평형점(UEP)을 구하는 방법으로서, 이를 3모선 계통 및 Stagg 5 모선 계통에 적용하여 정확한 안정여유도(stability margin)가 절실하게 요구되는 계통 중부하 시 매우 효율적으로 활용될 수 있음을 보였다. 불안정평형점(UEP)을 추정하는데 있어 에너지함수를 이용하였으며 안정여유도를 이용하는 전압안정도 해석의 예를 보였다.

본 논문에서는 단순한 부하 증가 패턴만을 고려하였으나 앞으로 다양한 부하 증가 시나리오에 대한 적용이 뒤 따라야 할 것이며 다모선 계통에 적용 및 보다 정확한 불안정평형점의 추정치를 구하는 연구가 뒤따라야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. T.J.Overbye, C.L.DeMarco, "Improved Techniques for Power System voltage Stability Assessment Using Energy Methods", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 6, no. 4, pp. 1446-1452, November 1991.
2. DeMarco, T.J. Overbye, "An Energy Based Security Measure for Assessing Vulnerability to Voltage Collapse", IEEE Trans. On Power System, Vol. 5, No. 2, pp. 419-427, May 1990
3. Overbye, R.P. Klump, "Effective calculation of power system low-voltage solutions",
4. IEEE Trans. On Power Systems, pp. 75-82, vol. 11, No. 1, Feb. 1996.
5. Iwamoto and Y. Tamura, "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems", IEEE Trans. Power App. And Sys., vol. PAS-100, pp. 1736-1743, April 1981.
6. 문영현, 김 백 의, 전력계통의 종합적인 안정도 해석(최종 보고서), 한국 과학재단, 1994
7. 김백, 전압 안정도 해석 이론의 동일성과 안정도 지표 산출, 연세대학교 전기공학과 대학원 박사학위 논문, Feb. 1995.
8. Tamura, H. Mori and S. Iwamoto, "Relationship Between Voltage Instability and Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems," IEEE Trans. On PAS., Vol. PAS-102, No. 5, May 1983.
9. Tamura, K. Sakamoto and Y. Tayama, "Current Issues in the Analysis of Voltage Instability Phenomena, " Proc. On bulk Power system Voltage Phenomena, Missouri, Sept. 1988.