

AC/DC 계통의 전압안정도 해석

남 해 곤 김 용 학*
전남대학교 전기공학과

Voltage Stability Analysis of AC/DC Systems

Haek-Kon Nam Yong-Hak Kim

Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University

Abstract

This paper describes an extension of a pair of multiple load flow solutions and nose curve method developed for voltage stability analysis of AC power systems to AC/DC systems. In this approach the converters are regarded as voltage dependent loads. Assuming that the converters at the unstable (-mode) solution consume the same power equal to the power at the stable (+mode) solution, the unstable solutions of the nose curves are determined.

This method is very efficient since estimating voltage collapse point and voltage stability margin are determined by a few iterations of multiple load flow solutions. Also the method has the advantages that since the structure of Jacobian matrix is same with that of AC load flow, modal analysis of voltage stability is readily applicable if desired.

1. 서론

전력회사들은 경제적인 이유와 심한 환경규제등으로 용지 확보등이 어려워 송전 및 발전시설을 증설하기가 어렵게 되어 기존의 송전선로를 이용하여 최대한의 전력을 수송하고자 하는 경향이 있다. 이는 電力潮流의 패턴을 바꾸고 송전선로를 限界容量에 가깝게 중부하로 운전하게 되어 적절한 전압 profile을 유지하는 것이 어렵다. 이로인한 위상각 안정도 (angle stability) 문제는 PSS등 안정화 기술의 발달로 어느정도 극복이 가능하였으나, 전압/무효전력 문제는 상대적으로 소홀히 취급되었다. 그 결과 최근에 세계의 많은 전력회사들이 전압문제에 기인한 대형 정전사고나 저전압 현상을 경험하였고, 전압안정도가 계통운용과 계획시에 가장 제약이 심한 요소로 대두됨에 따라 전압안정도 문제에 관한 관심이 증가 되었다[1].

전압안정도는 정상상태와 외란하에서 계통의 모든 모선이 적절한 전압을 유지할수 있는지 여부에 관심이 있다. 송전선로가 중부하로 운전되고 무효전력 공급이 부족할때 부하단의 전압 profile을 유지하는 것이 어렵고 심한 경우 전압크기가 계속 감소되고 제어할 수 없는 전압붕괴에 이르게 된다. 이와같은 전압붕괴 현상은 비선형 조류계산시의 다중해와 밀접한 관련이 있다는 것은 잘 알려져 있으며[5], AC/DC 계통의 전압안정도 해석방법으로 다음의 방법들이 제안되고 있다. PoC법에서는 임계점에서 Jacobian행렬이 특이하다는 조건을 조류계산에 추가하여 임계부하와 전압을 계산하는 방법이나 Jacobian행렬이 특이하다는 조건을 조류계산시에 추가하므로 문제의 크기가 약 2배로 확대되어 계산시간이 증가하고 중간과정의 정보를 이용할 수 없다는 단점이 있다[4]. VSTAB에서는 조류계산으로 임계점부근까지 부하를 증가시킨후 연속법으로 임계점에 접근시키고 고유치해석을 행한다. 이 방법의 효율성은 근사 임계점을 계산하는 속도에 좌

우되는데 연속법은 임계점부근에서 해를 강인하게 계산할 수 있으나 계산속도면에서 비효율적이어서 온라인으로 적용하기에는 부적합하다[7]. 그러므로 계통해석에서 유용하게 사용되는 것은 nose curve를 구성하는 한 쌍의 해이다. 중부하로 운전중인 전력계통에서 부하를 점점 증가시키면 전압이 감소하고 부하변화에 따른 전압강하율이 점점 증가하여 어느 한계점을 지나면 무효전력을 공급하더라도 전압은 상승하지 않고 계속 전압이 떨어져 전압붕괴가 발생하는데 이점을 임계점이라 하며 임계점부근에서는 부하전압의 크기가 큰것(+mode)과 작은것(-mode)의 한쌍의 해가 존재한다.[3] 모드해석에서는, 축약된 Jacobian 행렬의 고유치중에서 右半平면에 있거나 원점에 근접한 고유치와 고유벡터만을 선택적으로 계산하여 전압불안정 眞否 또는 전압불안정 근접도를 결정하는데 이러한의 조류계산을 수행하여 조류계산이 수렴하지 않는 부하점을 결정해야 하는 단점이 있다.[1,4]

따라서 본 논문에서는 다중조류계산 프로그램은 수행하여 +/-mode를 계산하고 Lagrange보간법을 사용하여 전압붕괴 임계점을 계산하여 온라인으로 신속하게 평가 가능한 nose곡선을 사용한 AC/DC 계통의 전압안정도 해석과 임계점부근에서 Jacobian 행렬을 사용한 모드해석을 수행하였다.

2. Nose curve 해석

nose curve를 작성하기 위해서 Gauss-Newton/N-R법을 사용하여 서로 다른 2개의 부하점에서 한쌍의 다중조류계산해 (+/-mode)를 구하고 전압붕괴에 가장 취약한 모선의 전압크기와 부하량을 Lagrange 3차 다항식으로 보간해서 전압붕괴 임계점을 계산하였다[3]. 일반적으로 전압안정도 해석에 사용된 loading/generating scenario는 다음과 같다.[6]

- 각 모선의 역류는 부하변화에 대해 인정하다.
- 각 모선의 부하는 총부하에 비례하여 증가한다.
- slack 모선을 제외한 모든 발전기의 유효전력 출력은 총부하에 비례하여 증가하고 모든 송전선상 증분은 slack 모선 발전기에 의해 흡수된다.
- 발전기 모선의 전압의 크기는 일정하게 유지된다.
- DC 선로의 전송전력은 일정하다.

전압붕괴 임계점 계산은 다음 알고리즘으로 수행하였다.
단계1 : N-R법을 이용하여 base case의 +mode해를 구한다.
단계2 : 총부하량 P_T 를 30% 증가시켜 +mode해를 구하고 N-R법이 수렴하지 않으면 단계 4를 수행한다.
단계3 : 가장 작은 모선전압 (V_{\min})이 0.7 p.u.보다 크면 단계 2를 수행하고 작으면 단계 5를 한다.
단계4 : 총부하량 증가분 P_T 를 전단계의 1/2로 감소시켜 N-R법이 수렴할때까지 반복하여 +mode 해를 구한다.

단계5 : Gauss-Newton법을 이용하여 다중조류계산을 수행하여 -mode해를 계산하고 만약 다중조류계산이 수렴하지 않으면 단계 2를 수행한다.

단계6 : 단계 5에서 -mode 초기치의 최대 전력위치가 0.1 p.u.보다 적으면 현재의 총부하량의 95%에서 한쌍의 다중근을 계산하고 그렇지 않으면 105%에서 한쌍의 다중근을 계산한다.

단계7 : 가장 취약한 모선의 +mode 해와 -mode 해의 전압차가 0.005보다 크면 3차 Lagrange 보간법을 이용하여 근사 일계 부하량을 계산하고 그렇지 않으면 현부하조건이 전압붕괴점에 가깝다고 간주하고 단계 9을 수행한다.

단계8 : 단계 6의 두개 부하조건에서 큰값을 P_{71} 으로 놓고 새로운 부하조건 P_{72} 를 선정하여 한쌍의 다중근을 계산한 후 단계 7을 수행한다.

단계9 : Lagrange 보간법을 이용하여 모든 모선에 대해서 전압 붕괴점을 계산한다.

3. 모드해석

전압붕괴 일계점부근에서 조류계산은 미소변화에 대하여 식 (3.1)의 선형식으로 나타낼수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{PQ} & J_{PV} \\ J_{QV} & J_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

전압불안정 현상은 무효전력 수급 불균형이 가장 중요한 요소이기 때문에 유효전력이 전압안정도에 미치는 영향이 미소하고 유효전력의 수급균형이 이루어진 상태에서 전압불안정 현상을 해석한다면 $\Delta P=0$ 라 가정할 수 있고, 이때 전압과 무효전력의 관계는

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{QP} J_{PP}^{-1} J_{PV}] \Delta V = J_R \Delta V \quad (\because J_R = [J_{QV} - J_{QP} J_{PP}^{-1} J_{PV}]) \quad (3.2)$$

이다. [1.4] J_R 은 reduced Jacobian matrix라 한다.

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (3.3)$$

따라서 J_R^{-1} 은 모선에서의 무효전력에 대한 전압의 감도를 의미한다. 즉, x_i, y_i 를 J_R 의 고유치 λ_i 에 대응되는 우/좌고유벡터라고 할때, 모선 k에서의 V-Q 감도는

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_i \frac{x_k y_{ik}}{\lambda_i} \quad (3.4)$$

전압붕괴 일계점 부근에서 J_R 은 singular에 가깝고 식 (3.4)에서 영에 가까운 고유치가 그렇지않은 고유치에 비하여 모선의 무효전력의 변화가 전압변동에 상대적으로 큰 영향을 준다. 이러한 의미에서 모든 고유치가 양의 값이면 계통은 전압안정이고 V-Q감도는 양의 값을 갖는다. 부하가 증가함에 따라 J_R 의 고유치들은 전압붕괴 일계점에서 적어도 하나의 고유치가 영이 되때 까지 작아진다. 만약 J_R 의 고유치가 음이면 일계점을 벗어나서 불안정하게 된다. J_R 의 고유치 크기는 전압불안정에 대한 상대적인 근접도를 제시하는 반면에 고유벡터들은 전압안정의 mechanism of loss에 대한 정보를 준다.

Bus Participation Factor(BPF)

모선 k가 모드 i에 참여하는 정도를 bus participation factor라 하며 다음 식으로 계산된다.

$$P_{ki} = x_k y_{ik} \quad (3.5)$$

BPF의 크기는 모선 k의 무효전력 보상이 그 모드를 안정화하는데 기여하는 정도를 의미하므로, 가장 크기가 작은 고유치에 대한 BPF 크기가 가장 큰 모선에 무효전력 보상을 하는것이 전압안정도 향상에 가장 효과적임을 알수있다.

Branch Participation Factor(BRPF)

선로 j가 모드 i에 참여하는 정도를 branch participation factor이라 하며 다음 식으로 계산된다.

$$P_{ji} = \frac{\Delta Q_{loss} \text{ for branch } j}{\text{maximum } \Delta Q_{loss} \text{ for all branch}} \quad (3.6)$$

이 BRPF는 i-mode에 대하여 무효전력 부하변화에 무효전력을 가장 많이 소비하거나 중부하로 운전되고 있는 정도를 지시한다.

Generator Participation Factor(GPF)

모선의 무효전력을 변화시킬때, 각 모선의 전압크기 및 위상각의 변화를 계산하여 각 발전기의 무효전력을 계산하면, 발전기 m의 participation factor는 다음 식으로 계산된다.

$$P_{mi} = \frac{\Delta Q \text{ for machine } m}{\text{maximum } \Delta Q \text{ for all machines}} \quad (3.7)$$

이 GPF는 i-mode에 대하여 무효전력 부하변화에 발전기가 무효전력을 공급하는 정도를 지시하며, 전압불안정 현상을 방지하기 위하여 각 발전기가 가져야하는 무효전력 공급 여분을 지시하는 중요한 정보이다.

4. Sample AC/DC 계통에 적용

그림 1은 AC/DC sample 계통의 원선도[2]이며 발전기 및 SVC는 무효전력 상하한에 대한 제약이 가하지 않고 sample계통에 대한 전압안정도 해석은 다음과 같다.

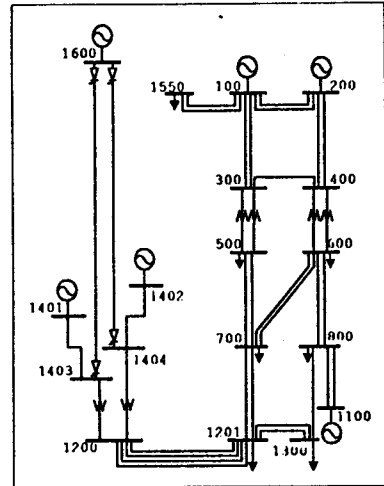
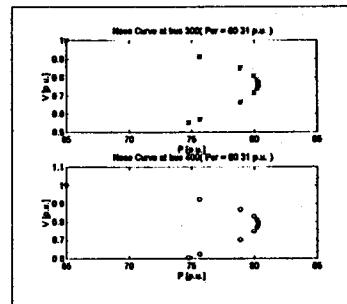


그림 1 AC/DC sample 계통의 원선도

nose curve 해석

그림 2는 sample 계통의 nose 곡선을 보여주며 총부하량이 base case에서 6500MW이고 일계점에서 8031MW 증가하여 전압붕괴에 이르기까지 1531MW 또는 23.5%의 부하증가가 가능하다. 부하가 증가함에 따라 모선 300, 400, 500, 600, 700, 1200의 전압크기가 큰 폭으로 감소되어 이 모선들이 취약한 모선임을 알 수 있다.



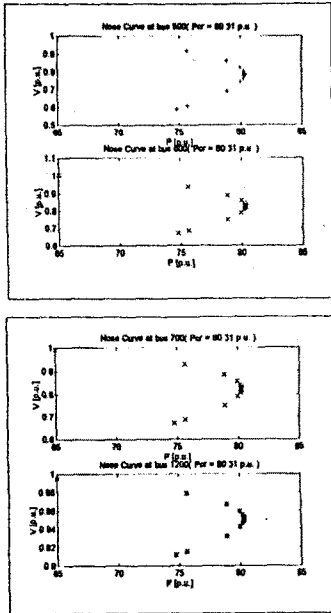


그림 2 sample 계통의 nose 곡선

모드해석

표 1은 base case에서의 reduced Jacobian 행렬의 고유치, PF, VQ 각도, BRPF, GPF를 보여주고 있다. 고유치가 모두 양로시 계통의 전압이 안정한 상태에 있으며, 크기가 가장 작은 고유치가 16.56으로 임계점으로부터 상당한 거리에 있음도 알 수 있다. 표 2는 임계점 부근에서의 reduced Jacobian 행렬의 고유치를 보여주며, 모든 고유치가 양의 수로시 계통의 전압이 안정 상태에 있고 가장 작은 고유치는 0.5506로 임계점에 근접하고 있음을 알 수 있다.

표 1 sample 계통에 대한 base case에서의 모드해석

고유치		λ = 16.565243									
Mode		Bus Part.			Branch Part.			Gen. Part.			
Bus	PF	VQ 각도	Branch	PF	Bus	PF	Bus	PF	Bus	PF	
16.56	0.1887	0.0114	200-100	0.0096	100	0.6427					
214.0	0.1435	0.0087	300-100	0.9822	300	0.5677					
382.51	0.2046	0.0124	1550-100	0.0000	1100	1.0000					
400.34	0.1332	0.0080	400-200	1.0000	1401	0.8119					
448.48	0.1542	0.0093	400-300	0.0125	1402	0.8119					
573.75	0.0932	0.0036	500-300	0.2309							
573.75	0.0200	0.0012	600-400	0.1964							
1120.36	0.0211	0.0014	700-500	0.0211							
1206.53	0.0696	0.0042	700-600	0.0923							
1300.00	0.0021	0.0001	800-600	0.2159							
1404.00	0.0021	0.0001	1201-700	0.3948							
1550.00	0.0000	0.0000	1100-800	1.0000							
			1300-800	0.0247							
			1201-1200	0.0982							
			1403-1200	0.2747							
			1404-1200	0.2747							
			1300-1201	0.5681							
			1403-1401	0.4486							
			1404-1402	0.4486							

표 2 sample 계통에 대한 critical point에서의 모드해석

고유치		λ = 0.5506385									
Mode		Bus Part.			Branch Part.			Gen. Part.			
Bus	PF	VQ 각도	Branch	PF	Bus	PF	Bus	PF	Bus	PF	
0.5506	0.2660	0.4833	200-100	0.0289	100	1.0000					
242.0	0.1982	0.3564	300-100	0.8829	200	0.9726					
385.1	0.2124	0.3859	1550-100	0.0000	1100	0.7515					
385.1	0.1312	0.2384	400-200	1.0000	1401	0.4138					
431.7	0.1215	0.2207	400-300	0.0100	1402	0.4138					
431.7	0.0373	0.0675	500-300	0.1007							
481.7	0.0064	0.0117	600-400	0.1416							
150.7	0.0076	0.0139	700-500	0.0351							
136.2	0.0200	0.0364	700-600	0.0228							
	0.0006	0.0010	800-600	0.1626							
	0.0006	0.0010	1201-700	0.1736							
	0.0000	0.0000	1100-800	0.1974							
			1300-800	0.0040							
			1201-1200	0.0035							
			1403-1200	0.0380							
			1404-1200	0.0380							
			1300-1201	0.0429							
			1403-1401	0.0322							
			1404-1402	0.0322							

5. 결론

본 논문에서는 변수소거법에 의하여 DC 변수들을 수치적으로 소거 가능하기 때문에 Jacobian 행렬은 그 구조가 AC 조류계산의 것과 동일하고 HVDC 링크를 조류계산에 포함하는 것이 용이하며 전압상과 임계점 부근에서의 Jacobian 행렬은 전압안정도의 고유치해석에 응용 가능한 장점이 있다.

nose 곡선의 하부에 위치한 -mode에서 비롯된 소비전력은 +mode에서의 소비전력과 같다는 가정하에 -mode 해와 nose 곡선은 한쌍의 다중조류계산해 구하는 방법에 의하여 계산하였다. 이 nose 곡선은 3차 Lagrange 다항식으로 직립되고 임계점은 다항식의 극점으로 결정된다. 이 방법은 수차례의 조류계산만으로 nose 곡선과 임계점의 계산이 가능하므로 계산시간이 온라인 적용이 가능한 정도로 빠르고 운전위에게 가장 유용한 정보인 전압상과 임계점까지의 마진을 제공하는 장점이 있다. 전압안정도의 모드해석은 bus, branch, generator participation factor 등 모선, 선로 발전기 등의 무효전력 공급함계/소비가 전압불안정에 기여하는 정도에 관한 nose 곡선이 제공하지 못하는 단점을 보완할 수 있다. 따라서 nose 곡선에 의해 임계점을 결정 후 임계점 부근에서 모드해석을 수행하여 매우 효율적인 전압안정도 해석 프로그램은 구현되었으며, AC/DC 전력계통의 전압안정도 해석, 계획 및 인공운용에 크게 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill Book Company, New York, 1994
- [2] PTI Interactive Power System Simulator -- PSS/E Sample System for PSS/E Manual, Nov. 1990
- [3] 남 해근, 김 동준, 문 채주, 전력계통의 전압안정도 온라인 평가를 위한 한쌍의 조류계산해와 전압상과 임계점의 계산, 대한전기학회 논문지, 43권, 8호, 1994, 8.
- [4] B. Gao, G. K. Morison and P. Kundur, " Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis ", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 4, November 1992
- [5] V. A. Venikov, V. A. Stroeve, V. I. Idelchick and V. I. Tarasov, " Estimation of Electrical Power System Steady-State Stability in Load Flow Calculation ", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, May/June 1975
- [6] A. Yokoyama and Y. Sekine, " A Static Voltage Stability Index Based on Multiple Load Flow Solutions ", Proc. of bulk Power System Voltage Phenomena, Missouri Sept. 1988
- [7] C. A. Canizares, P. L. Alvarado, C. L. DeMarco, I. Dobson and W. F. Long, "Point of Collapse Methods Applied to AC/DC Power Systems," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May 1992.