

전력계통 전압안정도 해석기술

김 건 중
(충남대학교)

1. 서 론

최근 산업의 고도화와 생활수준의 향상으로 하계 냉방부하 등의 전력수요가 지속적으로 증대되고 있다. 전력회사는 이러한 전력수요 증가에 효과적으로 대처하기 위하여 이에 상응하는 전력설비를 증설하여야만 한다. 이러한 설비중에서 중요한 것은 발전설비와 송전설비로 대별될 수 있다. 우리나라에서는 그 동안 발전설비를 지속적으로 확대하여 왔으며 이중에는 원자력 발전이 다수 포함되어 있다. 그러나 원자력발전소는 향후 건설이 매우 어려운 처지에 있으며 최근 점증하는 환경보호의 문제로 원자력발전소의 입지 확보는 거의 불가능한 실정이다. 따라서 앞으로는 화력발전소의 건설이 주종을 이룰 것으로 예견되지만, 화력발전소의 경우에도 지방화시대에 따른 지역이기주의에 의해 발전소의 입지 선정에 많은 저항이 예상되고 있다. 따라서 발전소의 위치는 이론적으로 부하 밀집지역에 근접한 곳에 건설하는 것이 바람직하지만, 현실적으로 많은 어려움이 따르기 때문에 상대적으로 부하 밀집지역에서 먼 곳에 건설되어야 하는 문제가 발생한다.

이러한 전력수요의 증가와 전원의 편재로 인한 지역간 유통전력의 증가는 전력계통의 무효전력 불균형을 초래할 뿐만 아니라 중조류 송전선로에서 사고라도 발생할 경우에는 계통전압이 이상적으로 저하하여 급기야 계통 대정전으로 진행되는 전압붕괴 현상을 발생시킬 수 있다.

선진 각국에서는 이미 전압붕괴에 의한 계통 대정전을 경험한 바 있으며, 이에 자극을 받아 현재는 실계통의 전압안정도를 신속하게 해석할 수 있는 상용화된 해석도구들을 개발, 운용하는 단계까지 와 있다. 우리나라에서도 학계를 중심으로 전압안정도와 관련하여 임계부하의 결정, 전압안정도 해석, 전압안정도 평가지수의 개발, 전압안정도의 제어, 계통의 동특성을 고려한 동적 전압안정도 해석, AC/DC 계통의 전압안정도 해석 등에 관한 이론 연구가 수행되어 왔다.

이에 본고에서는 전력계통의 전압안정도와 관련하여 전압안정도의 기본개념과 기술동향을 간략히 기술하고, 대표

적인 전압안정도 해석방법에 대하여 개괄적으로 살펴보고자 한다.

2. 본 론

2.1 전압안정도의 기본개념

전압안정도(Voltage Stability)란 정상상태에서 부하모선의 전압크기를 일정하게 유지하려는 전력계통의 능력으로 그림 1의 간단한 2모선 계통으로부터 전압안정도에 관한 이론을 유도할 수 있다.

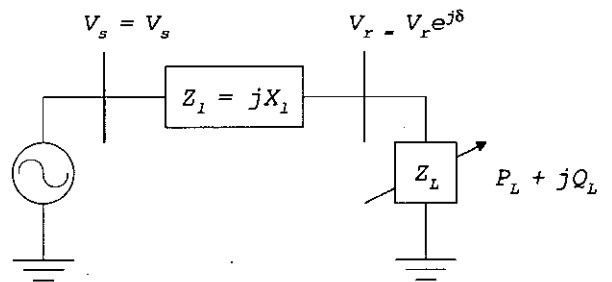


그림 1. 2모선 계통

문제를 간단히 하기 위해 선로임피던스는 리액턴스성분만 존재하고, 발전기의 위상각은 0으로 가정한다. 그림 1에서 좌측 모선을 기준모선으로 선정하면 전력조류방정식은 부하모선인 우측 모선에만 존재하게 되는데, 좌측 모선과 우측 모선사이를 흐르는 전류는

$$\begin{aligned}
 I_l &= \frac{V_s - V_r}{jX_l} \\
 &= \frac{V_s - V_r \cos \delta + jV_r \sin \delta}{jX_l} \\
 &= V_r \sin \frac{\delta}{X_l} + j \frac{V_r \cos \delta - V_s}{X_l}
 \end{aligned} \tag{1}$$

와 같고, 전력조류방정식은

$$P = \frac{V_s V_r}{X_l} \sin \delta \quad (2)$$

$$Q = \frac{V_s V_r \cos \delta - V_r^2}{X_l} \quad (3)$$

와 같다.

그림 2와 그림 3은 식(1)의 V-I 특성과 식(2)의 V-P 특성을 도시한 것인데, 그림 2에서 A점은 임피던스가 0인 경우이고, B점은 임피던스가 무한대인 경우이며, 그림 3에서 M점은 부하전력이 최대가 되는 점이다.

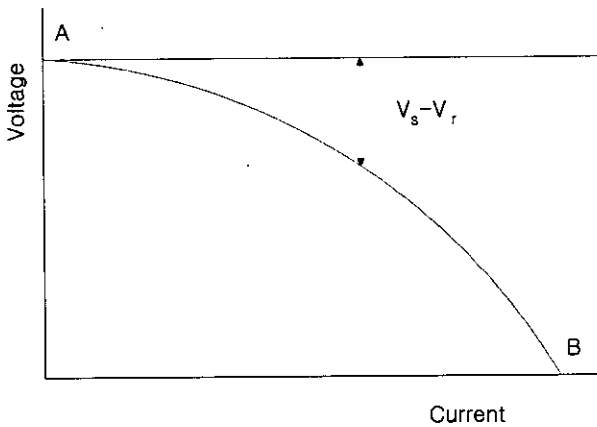


그림 2. 2모선 계통의 V-I 특성

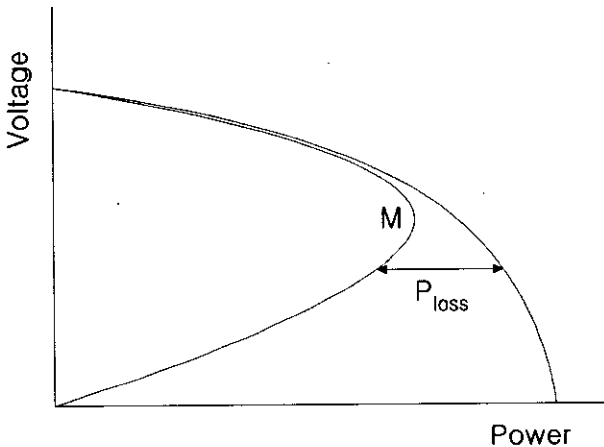


그림 3. 2모선 계통의 V-P 특성

그림 3에서와 같이 부하전력은 부하임피던스의 감소에 따라 점점 증가하다가 M점에서 최대가 되고, 이를 지나면 점점 감소하게 된다. 이는 M점을 지나면 계통의 손실이 급격히 증가하여 부하모선의 전압을 감소시키는데 기인하며, 이를 전압붕괴라고 한다. M점을 기준으로 하여 부하전력-전압의 특성이 서로 반대로 변하게 되는 바, M점 이하의 특성영역을 일반적으로 고장특성영역이라고 부른다. 이 영역은 보통 운전기준전압보다 훨씬 아래에 존재하지만, 콘덴서 보상이 있는 경우 상승할 수 있다.

전압을 불안정하게 하는 요인은 크게 2가지로 볼 수 있는데, 첫 번째는 과도한 콘덴서 보상용량으로 인한 경우이다.

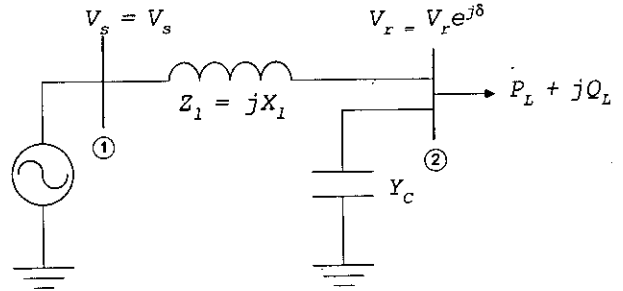


그림 4. 콘덴서로 보상한 2모선 계통

그림 1의 2모선 계통에서 우측 모선에 콘덴서 보상이 설치되어 그림 4와 같은 계통이 되면 계통의 무효전력은

$$Q = \frac{V_s V_r \cos \delta - V_r^2}{X_l} + Y_c V_r^2 \quad (4)$$

이 된다. 따라서 2번 모선의 전압이 일정하다고 가정하면 2번 모선의 전력은 콘덴서 보상용량만큼 증가하게 된다. 그림 5는 부하증가시 수전단 전압을 유지하기 콘덴서 보상용량을 점차로 증가시킨 경우의 V-P 특성을 보인 것으로 콘덴서 보상용량이 커지면 V-P 특성곡선의 꼭지점이 기준전압에 접근하고, 미소한 수요 변화에 대한 전압변동률이 커져 운전 불가능이 된다. 즉 콘덴서 보상용량을 증가하면 고장특성영역이 기준전압 근처에서 나타나게 된다.

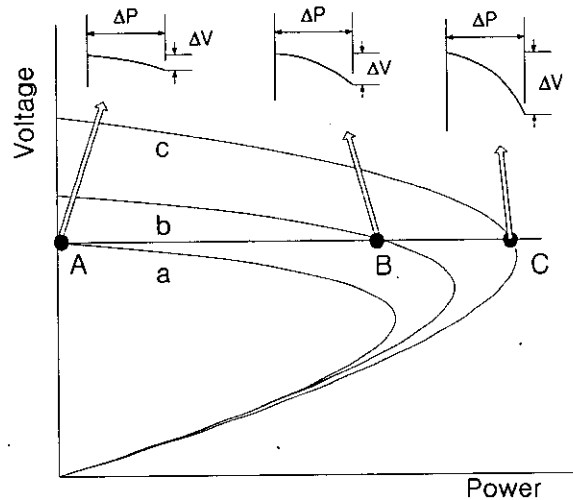


그림 5. 콘덴서 보상과 전압변동률

전압을 불안정하게 하는 요인중 두 번째는 계통 조건 변동으로 인한 경우이다. 그림 6은 계통구성의 변화로 인해 전압이 불안정해져 돌연 이행되는 경우를 보인 것이다. 계통에서 중부하 선로가 차단되면 선로 정전용량의 감소 및 임피던스의 급격한 증가로 이런 현상이 유발될 수 있다.

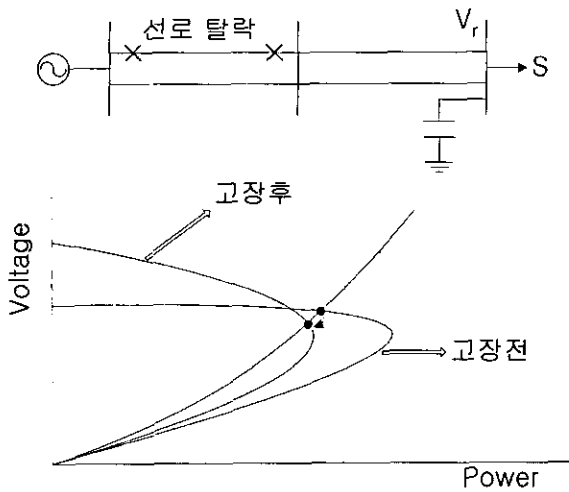


그림 6. 계통조건 변동시 전압불안정

2.2 전압안정도와 관련된 기술동향

전압안정도 문제가 실제계통에서 중요한 과제로 등장하기 시작한 것은 최근의 일로써 이 분야의 주된 연구동향은 전압 붕괴의 물리적 규명과 정적 전압안전성 확보를 위한 해석기법의 개발이다. 전압붕괴현상에 대한 해석적인 접근은 1975년 V.A.Venikov 등에 의해 시도되었다. 그는 정태안정도의 한계에서 조류계산의 자코비안 행렬식의 부호가 변화한다는 것을 발표하였다. 1983년도에 Tamura는 계통의 조류다근해를 구하고, 이에 의한 전압붕괴지점과의 여유를 산정함으로써 전압붕괴 근접지표를 제시하였다. 이 방법은 이론적으로는 타당하나, 계통의 규모가 커지는 경우에는 다근해를 구하는데 상당한 계산부담이 되는 단점이 있어 실용적이지 못하다. 1984년도에 Jarjis와 Galiana 등은 기존의 전력조류계산이나 최적조류계산을 사용하지 않는 모형을 제시하였다. 이 연구에서는 전력조류의 해가 존재할 수 있는 허용 영역의 범위와 최대 허용여유도를 결정하는 방법을 소개하고 있다. 이 방법은 전압안정도를 판단하는데는 확실하고 정확한 방법이나, 실제계통에 적용하기에는 너무나 방대한 계산시간을 소요하기 때문에 실용적이지 못하다. 1986년에 Glavitsch와 Kesse는 전압붕괴에 대한 새로운 접근법으로 간단한 2모선 계통에 대한 전압붕괴 근접도 지표를 유도하고, 이를 실제계통에 적용하기 위해서 계통을 발전 모선 집단과 부하모선 집단으로 분류하고 모선 어드미턴스 행렬을 혼합모형으로 표현하여 전압붕괴 근접도 지표를 계산하였다. 그러나 각 모선의 전압 위상각이 같은 패턴으로 변화한다는 가정이 수립해야 하기 때문에 실제 계통과는 거리가 있는 연구였다. 1987년에 Carpentier는 최적조류계산에 기초하여, 부하단의 무효전력 변화에 대한 전원의 무효전력 변화가 전압붕괴 시점에서 무한대가 된다는 점을 이용하여 무효전력 수요증분에 대한 무효전력 발전비율을 전압붕괴 근접도 지표로 사용하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 이론적으로 전압붕괴현상을 설명하는데는 매우 성공적이지만, 제약조건이 많은 실제계통에 적용하는데는 어려움이 있다. 1988년에 Thomas등을 중심으로 전압붕괴점을 해

석적으로 구하고자 하는 연구가 시도되었다. 이들은 전압붕괴점에서 자코비안 행렬이 특이점을 갖는다는 사실을 밝혀내고 이러한 성질을 이용하여 계통의 전압붕괴를 판정할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉, 전압안정도지표로 자코비안 행렬의 최소특이값을 이용하여 계통에 외란이 선행적으로 인가되는 경우 선행화된 최소특이값의 변화를 추적하고 모션전력의 최소특이값에 대한 선행감도를 계산하여 무효전력 제어에 응용하고자 하였다. 이 방법은 전압붕괴예방을 위한 무효전력 보상설비 투자문제에 접근한 점에서 높이 평가되나, 최소 특이치를 구하는 문제가 현실적이지 못하다는 단점이 있다. 1989년에 C. C. Liu 및 1991년에 Hiroshi 등은 전압붕괴에 OLTC가 미치는 영향을 해석하고 안정운전 영역에 대한 일련의 연구를 시행하였다. 이는 OLTC가 전압안정도에 부정적인 영향을 준다는 것을 규명하였으나, 다기 OLTC 계통으로 확장하는 경우 2²에 해당하는 평형점을 탐색하고 안정운전점을 구하는 관제로 실용화하기 어려운 점이 있다. 1990년에 Sekine 등은 유도전동기 모델을 사용한 동적모의로써 전압붕괴현상에 대한 해석을 시도하였다. 이 연구결과 전압 붕괴는 가장 약한 지점에서 발생되어 광범위한 영역으로 확장되며, 정적으로 전압안정 임계값을 지나더라도 동적으로 안정할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 1990년 및 1991년에 DeMarco, Overbye는 에너지 함수법을 이용하여 전압붕괴 안전성 평가지표를 개발하고, 이를 30모선 및 45모선 계통에 적용하였다. 대형 시스템에 적용한 점과 발전기 무효전력 한계, 무효부하특성 및 전압특성을 고려한 점은 우수하나, 이외의 제어계통의 효과가 고려되지 않는 단점이 있다. 1992년 B. Gao, Morison, Kunder 등은 전압안정도에 관련된 정보를 전 시스템에서 얻을 수 있는 Modal analysis 방법을 제시하였다. 이 방법은 전압과 무효전력에 대한 자코비안 행렬의 고유치(Eigen Value)와 고유벡터(Eigen Vector)를 구함으로써 전압불안정에 가까운 모드들과 밀접하게 관련된 선로와 발전기들을 찾아낼 수 있어 전압불안정의 예방을 위한 운전방법에 활용될 수 있다. 그러나 고유치의 계산이 큰 부담이 되는 약점이 있다.

2.3 전압안정도 해석방법

전력계통에서는 일반적으로 현재의 운전점이 전압붕괴점으로 부터 얼마나 멀리 떨어져 있는가로 전압안정도 측면에서의 안정, 불안정 여부를 판정하는데, 이때 전압안정도의 판정기준이 되는 전압붕괴점은 전압안정도를 해석함에 있어서 계통 부하를 어떻게 증가시키느냐에 따라, 증가된 부하에 맞게 발전력을 어떻게 처리하느냐에 따라 다양한 값으로 결정될 수 있기 때문에 특히 실제계통을 대상으로 한 전압안정도 해석에서는 실제 계통 운전조건들을 반영하여 모션부하나 발전력을 처리하여야만 정확한 결과를 얻을 수 있다.

본 절에서는 전압안정도와 관련된 대표적인 해석방법으로 뉴턴-랩슨 조류계산법(Newton-Raphson Load Flow Method), 직점법(Point of Collapse Method), 연속조류계산법(Continuation Power Flow Method), 최적화 조류계산법

(Optimal Load FLOW Method)을 살펴보고자 한다.

(1) N-R 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석

조류계산의 반복을 통해서 안정영역의 운전점을 P-V 평면이나 Q-V 평면상에 도시하고, 현재의 운전점이 전압붕괴점으로부터 얼마나 멀리 떨어져 있는가로 전압안정도 측면에서의 안정, 불안정 여부를 판정하는 방법이다. 특별한 알고리즘없이 현재의 운전점에서 지정된 시나리오대로 부하와 발전력을 증가시켜가면서 조류계산을 반복 수행하는 것만으로 전압안정도 해석이 가능하나, 전압붕괴점 및 전압붕괴점 부근에서는 자코비안 행렬의 특이성으로 인해 해를 구할 수 없다는 단점이 있다.

(2) Point of Collapse법

조류계산식에 전압붕괴점에서의 자코비안 행렬은 특이행렬이라는 필요조건을 추가한 비선형 연립방정식을 뉴턴-랩슨법으로 풀어 전압붕괴점을 직접 계산한다.

Point of Collapse법에서는 미리 정해진 부하방향에 대하여 식(5)의 조류계산식을 만족하고, 자코비안 행렬이 특이하다는 식(6)의 조건과 좌고유벡터의 크기가 1이라는 식(7)의 조건을 연립하여 뉴턴-랩슨법으로 전압붕괴점을 구한다.

$$f(x, \lambda_0 + kN) = 0 \tag{5}$$

$$J_{x, \lambda_0 + kN} w = 0 \tag{6}$$

$$\|w\|_2 = 1 \tag{7}$$

Point of Collapse법은 조류계산식에 전압붕괴점에서의 자코비안 행렬은 특이행렬이라는 필요조건을 추가한 비선형 연립방정식을 뉴턴-랩슨법으로 풀기 때문에 일단 수렴이 시작되면 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있으나, 초기값이 전압붕괴점에 충분히 근접해 있지 않으면 뉴턴-랩슨법의 특성상 발산할 우려가 있어 직접법에 필요한 초기값을 다른 방법을 통해서 제공해야 하는 단점이 있다.

(3) 연속조류계산법을 이용한 전압안정도 해석

연속조류계산법은 임의의 운전점에서 부하가 서서히 변화할 때, 이에 따라 움직이는 조류방정식의 해를 추적하여 전압붕괴점을 계산하는 방법으로 예측과정과 수정과정으로 구성된다.

가. 예측과정

연속조류계산법에서 예측과정은 현재의 조류해로부터 다음해의 추정값을 구하는 과정이다.

부하 파라미터 λ 를 포함하는 조류방정식은

$$f(\delta, V, \lambda) = 0 \tag{8}$$

과 같다. 여기서 δ 는 모선전압의 위상각 벡터이고, V 는 모

선전압의 크기 벡터이다.

먼저 현재의 조류해에서의 다음해의 방향을 나타내는 접선벡터를 구하기 위하여 식 (8)의 양변을 미분하면

$$[f_\delta \ f_V \ f_\lambda] \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [0] \tag{9}$$

와 같고, 식(9)를 이용하여 $[d\delta \ dV]^T$ 를 구하면

$$\begin{bmatrix} d\delta \\ dV \end{bmatrix} = -[f_\delta \ f_V]^{-1} f_\lambda d\lambda \tag{10}$$

와 같다. 그러나 전력조류 자코비안 $[f_\delta \ f_V]$ 가 ill-condition 일 때, 식(10)으로는 $[d\delta \ dV]^T$ 를 구할 수 없어 연속조류계산의 예측과정에서는 이를 극복하기 위해 식 (10)에 접선벡터 $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 성분중 하나를 선택하는 식을 다음과 같이 추가한다.

$$[f_\delta \ f_V \ f_\lambda] \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서, e_k 는 k번째 성분만이 1이고, 나머지 성분들은 0인 행벡터이다. 덧붙여진 식은 접선벡터 성분중 하나의 크기를 1로 정하는 식이고, 우항에서 \pm 부호는 선택된 접선벡터 성분의 부호를 유지시키기 위한 것이다. 위 식에서 λ 는 하나의 상태변수로 사용되고 있고, 덧붙여진 식으로 선택된 상태변수는 연속 파라미터라 불리운다. 식 (11)에서 전력조류 자코비안 $[f_\delta \ f_V]$ 이 특이성을 갖더라도 F_λ , e_k 가 덧붙여진 자코비안을 이용하여 접선벡터 $[d\delta \ dV \ d\lambda]^T$ 를 구할 수 있게 된다. 이제 현재 해 $[\delta_0 \ V_0 \ \lambda_0]^T$ 로부터 다음단계 해의 추정값 $[\delta_1^i \ V_1^i \ \lambda_1^i]^T$ 은 계산된 접선벡터를 이용하여

$$\begin{bmatrix} \delta_1^i \\ V_1^i \\ \lambda_1^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_0 \\ V_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\delta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} \tag{12}$$

의 식으로 구할 수 있다. 여기서, σ 는 스텝크기를 나타내는데 스텝크기는 수정과정의 수렴반경안에 다음해의 추정값이 존재하도록 선택되어야 한다.

나. 수정과정

수정과정에서는 예측과정에서 계산된 다음 해의 추정값 $[\delta_1^i \ V_1^i \ \lambda_1^i]^T$ 로부터 조류해 $[\delta_1 \ V_1 \ \lambda_1]^T$ 를 구하는 과정으로 다음과 같이 하나의 식이 덧붙여져 확장된 전력조류방정식의 해를 N-R 반복법을 이용하여 계산한다.

$$\begin{bmatrix} f(\delta, V, \lambda) \\ g(\delta, V, \lambda) \end{bmatrix} = 0 \tag{13}$$



국부적으로 파라미터화된 연속 알고리즘을 적용한 연속조류 계산에서는 다음식을 g 로 이용한다.

$$X_k - \eta = 0 \quad (14)$$

여기서, X_k 는 예측과정에서 선택한 연속 파라미터이고, η 는 연속 파라미터의 다음 해의 추정값이다. 그러므로, 식 (14)을 덧붙여서 확장된 전력조류방정식을 이용하여 조류해를 구하게 되면, 연속 파라미터는 예측과정에서 계산된 추정값에 고정된다. 식 (14)을 덧붙인 전력조류방정식의 수정방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} f_\delta & f_V & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(\delta_i, V_i, \lambda_i) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

위 식에서도 덧붙여진 자코비안을 이용하므로 정적인 전압붕괴점과 그 점 부근에서의 전력조류 자코비안이 특이성을 갖게 되어 나타난 수렴곤란의 문제를 해결할 수 있다. 그림 7은 연속조류계산법에 의한 전압안정도 해석과정을 도시한 것이다.

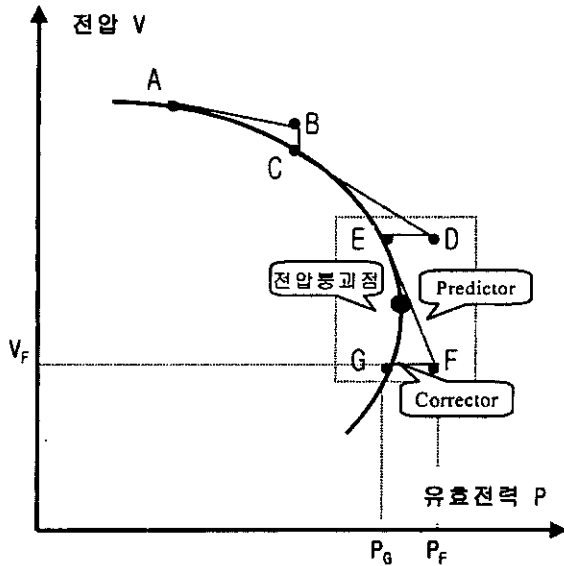


그림 7. 연속조류계산법에 의한 전압안정도 해석.

연속조류계산법은 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서는 물론 불안정영역에서도 강인하게 해를 구할 수 있으나, 계산시간과 수렴특성이 스텝크기에 큰 영향을 받으며, 특히 전압붕괴점을 계산하기 위해서는 전압붕괴점 부근에서 스텝크기를 매우 작게 취해야 하는 단점이 있다.

(4) 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석

최적화 조류계산법은 모선에서의 수급조건, 즉 모선전력에 대한 요구량과 계산량의 차를 최소화하는 것을 목적함수로 하고, 계통의 모선전력방정식을 제약조건으로 가지는

최적화 문제로부터 유도한 최적조건식을 N-R법으로 풀어 계통상태를 결정한다.

$$\Delta G(z) = [H] \cdot \Delta z \quad (16)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & H_{VV} & H_{V\theta} & J_{PV}^T & J_{QV}^T \\ 0 & 0 & H_{\theta V} & H_{\theta\theta} & J_{P\theta}^T & J_{Q\theta}^T \\ -I & 0 & J_{PV} & J_{QV} & 0 & 0 \\ 0 & -I & J_{P\theta} & J_{Q\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Delta z = [\Delta y_P \ \Delta y_Q \ \Delta V \ \Delta \theta \ \Delta \lambda_P \ \Delta \lambda_Q]^T \quad (18)$$

$$\Delta G(z) = \left[\frac{\partial L}{\partial y_P} \ \frac{\partial L}{\partial y_Q} \ \frac{\partial L}{\partial V} \ \frac{\partial L}{\partial \theta} \ \frac{\partial L}{\partial \lambda_P} \ \frac{\partial L}{\partial \lambda_Q} \right]^T \quad (19)$$

최적화 조류계산법에서 사용되고 있는 λ_P, λ_Q 는 각 모선에서 공급할 수 있는 전력량 (y_P, y_Q)과 각 모선에서 요구되는 전력량 (y^s_P, y^s_Q)의 차를 나타내는데, 운전점이 존재하는 안정영역에서는 0값을 가지고, 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서는 0이 아닌 값을 가진다. 따라서, λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법에 의해 계산된 해가 안정영역의 운전점인지, 불안정영역의 해인지를 판정할 수 있는 지표가 될 수 있으며, 특히 불안정영역에서의 λ_P, λ_Q 는 최적화 조류계산법에 의해 구해진 해와 전압붕괴점사이의 상대적인 거리를 나타낸다.

최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 절차는 다음과 같다.

- 1) 운전점이 존재하는 안정영역에서는 부하를 증가시켜가면서 최적화 조류계산법으로 해를 구한다. 이때 최적화 조류계산법은 기존 방법과는 달리 전압붕괴점 부근에서도 안정적으로 해를 구할 수 있다.
- 2) 안정영역에서 해를 구하다가 어느 단계가 되면 부하증가가 과다하여 불안정영역으로 넘어가게 되는데, 기존 방법과는 달리 최적화 조류계산법은 운전점이 존재할 수 없는 불안정영역에서도 해를 구할 수 있다. 이때 최적화 조류계산법으로 계산된 해는 운전점이 될 수 없지만, 전 단계에서 부하가 얼마나 과다하게 증가하였는가를 나타내는, 즉 계산된 해로부터 전압붕괴점까지의 상대적인 거리를 나타내는 λ_P, λ_Q 를 제공한다.
- 3) 전 단계의 부하로부터 λ_P, λ_Q 를 차감한 후, 최적화 조류계산법을 수행한다. 결과적인 해는 불안정영역에 존재하지만, 전 단계보다는 전압붕괴점에 근접한 해가 된다.
- 4) 과정 3)을 목적함수와 λ_P, λ_Q 가 0이 될 때까지 반복하여 정확한 전압붕괴점을 구한다.

이와 같이 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석 알고리즘은 단순히 최적화 조류계산법의 반복 실행과 이를 통해서 제공되는 λ_p, λ_q 만을 이용하여 전압붕괴점을 구하기 때문에 기존 방법보다 알고리즘이 간단하며, 특히 불안정영역에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정은 기존 방법과는 달리 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지 않고, λ_p, λ_q 의 감소방향으로 자동 처리되기 때문에 신속, 정확하게 전압붕괴점을 구할 수 있다는 장점이 있다.

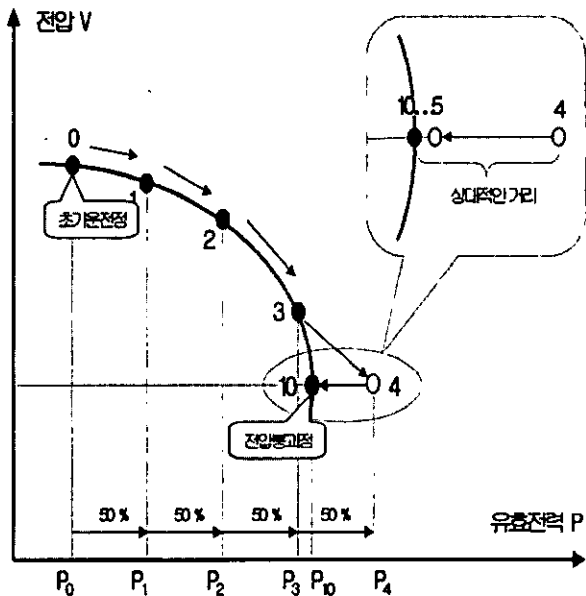


그림 8. 최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석.

3. 결 론

본고에서는 전력계통의 전압안정도와 관련하여 전압안정도의 기본개념과 기술동향을 간략히 기술하고, 대표적인 전압안정도 해석방법에 대하여 개괄적으로 살펴보았다. 대표적인 전압안정도 해석방법의 특징은 다음과 같다.

1) 조류계산법은 현재의 운전점으로부터 부하와 발전력을 증가시켜가면서 조류계산을 반복 수행하는 것만으로 전압안정도 해석이 가능하나, 전압붕괴점 및 전압붕괴점 부근에서는 자코비안 행렬의 특이성으로 인해 해를 구할 수 없다는 단점이 있다.

2) 직접법은 조류계산식에 전압붕괴점에서의 자코비안 행렬은 특이행렬이라는 필요조건을 추가한 비선형 연립방정식을 뉴턴-랩슨법으로 풀기 때문에 일단 수렴이 시작되면 빠르고 정확하게 해를 구할 수 있으나, 초기값이 전압붕괴점에 충분히 근접해 있지 않으면 뉴턴-랩슨법의 특성상 발산할 우려가 있어 직접법에 필요한 초기값을 다른 방법들 통해서 제공해야 하는 단점이 있다.

3) 연속조류계산법은 전압붕괴점을 포함한 안정영역에서는 물론 불안정영역에서도 강인하게 해를 구할 수 있으나,

계산시간과 수렴특성이 스텝크기에 큰 영향을 받으며, 특히 전압붕괴점을 계산하기 위해서는 전압붕괴점 부근에서 스텝크기를 매우 작게 취해야 하는 단점이 있다.

4) 최적화 조류계산법은 조류계산을 반복 수행하고, 이를 통해서 제공되는 λ_p, λ_q 만을 이용하여 전압붕괴점을 구하기 때문에 기존 방법보다 알고리즘이 간단하며, 특히 불안정영역에서 전압붕괴점을 찾아가는 과정은 기존 방법과는 달리 부하증가의 스텝크기에 영향을 받지 않고, λ_p, λ_q 의 감소방향으로 자동 처리되기 때문에 신속, 정확하게 전압붕괴점을 구할 수 있다는 장점이 있다.

향후 전력산업 환경변화에 대응하여 Off-Line 위주로 이루어져오던 해석기술을 On-Line화할 수 있는 연구가 추진되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [2] Carson W. Taylor, Power System Voltage Stability, McGraw-Hill, Inc. 1994.
- [3] Ian Dobson, Liming Lu, "New Methods for computing a Closest Saddle Node Bifurcation and Worst Case Load Power Margin for Voltage Collapse", IEEE Trans on PS, vol.8, No.3, 1993.
- [4] M.Suzuki, S.Wada, M.Sato, T.Asano, Y.Kudo, "Newly Developed Voltage Security Monitoring System", IEEE SM 492-9 PWRs, 1991.
- [5] M. Suzuki, Y. Kishida, "On-Line Voltage Security Monitoring System", T.IEE Japan Vol.111-B, No.3, 1991.
- [6] M. Suzuki, S. Wada, Y. Kudo, T. Asano, "기간계통 전압안전성 감시시스템의 개발", 도시바리뷰 Vol.45 No.7, 1990.
- [7] 추진부의, 중장기 전압안정도 분석 및 무효전력설비 운용방안 연구, 한국전력공사 기술연구원, 1992.
- [8] 이길순외, 계통의 안전성 제어를 고려한 동적 전압안정도에 관한 연구. 한국전력공사 기술연구원, 1994.
- [9] 추진부의, 전력계통 전압안전성 자동감시시스템 개발, 한국전력공사 전력연구원, 1998.
- [10] 남해곤, 김동준, 문채주, "전력계통의 전압안정도 온라인 평가를 위한 한쌍의 다중조류계산 해와 전압붕괴 임계점의 계산", 대한전기학회 논문집 제43권 제8호, pp.1226~1238, 1994.
- [11] 남해곤, 송충기, 김동준, "최단 전압붕괴점 계산을 위한 개선된 직접법과 재급전에 의한 전압안정도 향상", 대한전기학회 논문집 제48권 제8호, pp.958~964, 1999.
- [12] 남해곤, 김동준, 송충기, 문영환, 김동준, 이효상, "전압붕괴 임계점 계산을 위한 효율적 통합법", 대한전기학회 논문집 제48권 제8호, pp.951~957, 1999.



- [13] 송화창, 이병준, 권세혁, “실용적인 스텝크기 선택 알고리즘을 고려한 연속조류계산 시스템의 개발”, 대한전기학회 논문집 제48권 제8호, pp.190~196, 1999.
- [14] 김건중, 김원경, 김용배, 이상중, 정태호, “전력계통에서 유효전력 손실감도에 근거한 새로운 전압붕괴 근접도 지표”, 대한전기학회 논문집 제42권 제10호, pp.29~36, 1993.
- [15] 전동훈, 추진부, 김건중, 이병일, “최적화 조류계산법을 이용한 전압안정도 해석”, 대한전기학회 논문집 제50권 제7호, 2001.

저자 소개



김건중 (金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1977년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1977년 해군 제2사관학교 교수. 현재 충남대학교 전기공학과 교수