

증배형 부하회복 모델을 포함하는 연속법 기반 준정적 해석

Continuation-Based Quasi-Steady-State Analysis Incorporating Multiplicative Load Restoration Model

송 화 창*, Venkatanamana Ajjarapu
(Hwachang Song and Venkataramana Ajjarapu)

Abstract : This paper presents a new continuation-based quasi-steady-state(CQSS) time-domain simulation algorithm incorporating a multiplicative aggregated load model for power systems. The authors' previous paper introduced a CQSS algorithm, which has the robust convergent characteristic near the singularity point due to the application of a continuation method. The previous CQSS algorithm implemented the load restoration in power systems using the exponent-based load recovery model that is derived from the additive dynamic load model. However, the reformulated exponent-based model causes the inappropriate variation of short-term load characteristics when switching actions occur, during time-domain simulation. This paper depicts how to incorporate a multiplicative load restoration model, which does not have the problem of deforming short-term load characteristics, into the time simulation algorithm, and shows an illustrative example with a 39-bus test system.

Keywords : continuation, load restoration model, quasi-steady-state analysis, time-domain simulation

I. 서론

전압안정도는 전력 시스템의 안전한 운전을 위해 필수적으로 검토되어야 하며 운전의 한계를 결정짓는 중요한 요소 중 하나이다. 최근 전력 산업에 경쟁의 개념이 도입되면서, 기존의 수직통합적 계통 운영 시 보다 전력 조류 패턴의 범위가 넓어지고 이에 따라 송전 시스템 요소들에 대한 부하가 증대되어 전력 시스템에 대한 전압불안정 및 전압붕괴의 가능성이 증가하게 된다. 본 논문에서는 전력 시스템 안전도 유지에 있어 필수적인 전압안정도 해석 및 평가를 위해 수행되어야 하는 시모의(time simulation)해석에 관하여 논하고자 한다.

전압안정도 현상은 다양한 시간대(time scales)의 동적현상을 포함한다[1-3]. 즉 최근의 IEEE 안정도 정의 및 분류 [4]에서 전압안정도에 대한 단기(short-term) 및 장기(long-term)적 정의를 표준화하였다. 따라서 전압안정도 해석시 다양한 시간대의 다이내믹스를 고려해야 하며, 상세 해석을 위해 이들을 포함한 전력 시스템 미분-대수 방정식에 대한 초기값 시적분 해석이 필요하다.

문헌 [5]에서, Astic 등은 Backward Differentiation Formulae (BDF) 및 Adams 법을 혼합하여 적용하여 적분차수 및 스텝 크기를 시적분 에러의 예측값으로 결정하는 알고리즘을 제안하여 다양한 시간대의 다이내믹스를 고려할 때 발생할 수 있는 시적분 에러를 효과적으로 줄일 수 있도록 하였다. 문헌 [6]에서, Van Cutsem 등은 일반적인 전압불안정 현상에 영향을 미치는 장기 다이내믹스를 주로 고려하여 빠른 시모의가 가능하도록, 단기 다이내믹스가 안정한 운전점으로 빠르게 수렴한다는 준정적 가정의 개념을 도입한 준정

적(QSS, Quasi-Steady-State) 시모의 기법을 제안하였다. 문헌 [7]에서, Ajjarapu 등은 QSS 시모의 해석시 특이점(singularity point)에 다가감에 따라 발생할 수 있는 발산의 문제를 해결하고 N-R 반복의 회수를 줄이기 위하여 예측-수정 과정을 포함하는 연속법(continuation method) [8]을 적용하였다.

본 논문에서는 연속법 기반 준정적 해석법(CQSS, continuation-based QSS analysis)에서 포함하고 있는 재구성된 증배형 부하회복 모델(additive load restoration model)의 단기 부하 특성의 왜곡의 문제점을 설명하고 이러한 문제점을 갖지 않은 증배형 부하회복 모델(multiplicative load restoration model)을 CQSS 알고리즘에 적용하고자 한다. 기존의 CQSS는 연속법을 적용하기 위하여 부하회복 모델을 시적분이 포함하지 않도록 부하회복 모델을 시간의 함수인 지수형 기반의 모델로 변환하여 적용하였으나, 본 논문에서는 증배형 부하모델을 CQSS에 포함시키기 위하여 일반적인 시적분법을 포함하며 가장 크게 변하는 부하 회복 파라미터를 시스템 파라미터로 포함시켜 연속법을 적용하는 방법을 제안한다. CQSS는 기존의 QSS에 비하여 특이점 부근에서 해 결정을 위한 수정과정의 반복회수를 줄일 수 있을 뿐 아니라 예측과정에서 계산되는 tangent 벡터로부터 궤도감도(trjectory sensitivity) 정보를 얻을 수 있다. 사례연구에서는 증배형 부하모델을 포함하는 CQSS 해석법을 New England 39-모선 계통에 적용하고 기존의 QSS와 비교한 결과를 설명한다.

II. 연속법 기반 준정적 시모의 해석

다양한 시간대의 다이내믹스를 포함하고 있는 전력 시스템의 모델은 다음과 같은 식으로 간단하게 표현될 수 있다 [1-3].

$$\frac{d}{dt}x = f(x, y, z_D, z_C, \lambda) \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 3. 19., 채택확정 : 2007. 12. 12.

송화창 : 군산대학교 전자정보공학부(hcsong@kunsan.ac.kr)

Venkatanamana Ajjarapu : Iowa State University(vajjarap@iastate.edu)

※ 본 논문은 군산대학교 신입교수 연구비 지원으로 연구하였음.

$$0 = g(x, y, z_D, z_C, \lambda) \quad (2)$$

$$z_D(k^+) = h_D(x(k^-), y(k^-), z_D(k^-), z_C(k^-), \lambda(k^-)) \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} z_C = h_C(x, y, z_D, z_C, \lambda) \quad (4)$$

여기에서 x 과 $f(\cdot)$ 는 여자 시스템과 원동기 및 조속기를 포함하는 동기기의 다이내믹스를 표현하는 상태변수 및 함수를 의미하며, y 와 $g(\cdot)$ 는 전기 네트워크 방정식을 나타내는 대수변수 및 함수이다. 그리고 x 는 비교적 빠르게 응답하는 단기 다이내믹스(short-term dynamics)를 의미한다. 본 논문의 주된 관심부분에 해당하는 장기 다이내믹스(long-term dynamics)는 (1)~(4)에서 z_D, z_C 로 표현된다. z_D 는 탭에 의한 자동 변압 제어 기능을 포함하는 ULTC(Under Load Tap Changers) 변압기의 탭변환 등을 나타내는 이산적인 상태변수를 의미하고 $h_D(\cdot)$ 는 이에 해당하는 차분 방정식 함수이다. 이와 달리 z_C 는 부하회복(load recovery) 동특성을 의미하는 상태변수이며 $h_C(\cdot)$ 는 이에 해당하는 미분 방정식 함수이다. 마지막으로 λ 는 전력 시스템의 부하변동 및 발전력 재분배를 표현한다.

준정적(QSS, Quasi-Steady-State) 해석에서는 (1)을 평형점 방정식으로 대체하여 시간영역 모의(time domain simulation)를 수행한다. 이러한 준정적 해석을 이용하여 해석을 수행할 때는 기본적인 가정이 필요하다. 이것은 (1)로 표현되는 단기 다이내믹스가 계통 동요(disturbance) 후 본 논문에 주된 관심사항인 장기 다이내믹스에 비하여 아주 빠르게 수렴하여 안정한 운전점으로 도달한다는 것이며 이를 준정적 가정(QSS assumption)이라고 한다. 준정적 가정을 기반으로 하여 해석을 수행할 경우, 일반적으로 사용되는 시모의 해석보다 장기 안정도 측면에서 보다 빠른 모의가 가능하다.

전력 시스템에 대한 준정적 해석의 기본적인 구현방법은 [6]에서 설명하고 있다. 준정적 모의에서 각 적분스텝에서 상태변수 x, y 를 풀기 위해 다음과 같은 수정방정식을 이용한다.

$$J_{xy} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f(\cdot) \\ g(\cdot) \end{pmatrix}, \quad J_{xy} = \begin{pmatrix} f_x & f_y \\ g_x & g_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

여기에서 J_{xy} 는 단기 다이내믹스를 표현하는 함수 및 대수 방정식 함수의 x, y 에 대한 자코비안 행렬을 나타낸다. 그리고 $\Delta x, \Delta y$ 는 (5)의 우측항에 해당하는 residual을 줄이기 위한 상태변수 x, y 의 변화분을 표현하는 수정벡터이다.

준정적 해석시 (1)~(4)로 표현되는 시스템이 특이점(singular point)에 근접해 있을 때, J_{xy} 의 역행렬을 구할 때 수치적 어려움이 존재하므로 특이점 부근에서 해가 발산하거나 수렴을 위해 많은 Newton 반복이 필요할 수 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 연속법(continuation method)을 기반한 준정적 해석법(CQSS, continuation-based QSS analysis)이 제안되었다 [7]. 연속법 [8]은 상태변수의 함수로 표현되지 않은 하나의 시스템 파라미터에 대한 해의 경로를 추적하는 기법으로 적절한 연속 파라미터(continuation parameter)를 선택하고 확대 자코비안을 이용함으로써 기존의 자코비안의 특이성을 극복할 수 있어 해당하는 해법이

강건한 수렴성을 갖도록 한다.

원래의 준정적 모의는 부하회복 모델을 이전 스텝에서의 해로부터 적분을 수행하여 구현한 것과는 달리, 부하회복 모델을 대수화하고 가장 큰 변화를 경험하는 변수를 연속 파라미터로 선택하고 이를 포함하는 확대 자코비안을 구성하고 예측 및 수정과정을 통하여 다음 스텝에서의 해를 구한다. 다음 (6), (7) 각각 예측 및 수정과정에서 이용되는 방정식을 나타내고 있다.

$$\begin{pmatrix} f_x & f_y & f_\alpha \\ g_x & g_y & g_\alpha \\ e_k^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ d\alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} f_x & f_y & f_\alpha \\ g_x & g_y & g_\alpha \\ e_k^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \alpha \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f \\ g \\ 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기에서 예측과정 방정식의 해에 해당하는 $[dx \ dy \ d\alpha]^T$ 는 현재 스텝에서의 해에서의 tangent 벡터를 나타내며 다음 해를 예측하는 데 이용된다. 그리고 α 는 각 부하모선의 동적 부하모델의 유효전력의 전압의존 지수 중 가장 큰 부하변화를 보이는 지수에 해당한다. 부하모델과 관련한 내용은 다음 장에서 좀 더 자세히 설명된다. (6)과 (7)에서 이용되는 자코비안은 f_α, g_α 및 e_k^T 를 포함하고 있어 (5)에서의 J_{xy} 보다 한 차원 더 큰 행렬이다. e_k 는 k 번째 성분 만 1에 해당하고 나머지는 0으로 채워져 있는 단위 벡터를 의미한다. 각 연속 스텝에서 k 는 연속 파라미터를 선택하도록 결정되며 이로써 확대 행렬의 특이성을 회피할 수 있게 된다.

기존의 준정적 해석에서와는 달리 CQSS는 tangent 벡터를 구하기 위한 (6)으로 표현되는 선형방정식의 해를 구하여야 한다. 이는 Newton 반복의 1회에 해당하는 것이다. 그러나 기존의 준정적 해석을 적용할 경우 시스템이 특이점 부근에 있을 때, 해의 수렴을 위하여 많은 Newton 반복이 필요하며 심각한 경우 발산하게 된다. 따라서 CQSS는 특이점 부근에서 예측 및 수정과정을 통해 좀 더 빠르고 강건한 수렴 특성을 갖게 된다.

III. 증배형 부하회복 모델의 적용

본 절에서는 CQSS에 대한 증배형 부하회복 모델의 적용에 대하여 설명하고자 한다. 그림 1에서 전력 시스템에서 장기 전압불안정 모의의 예를 설명하고 있다. 그림 1에서 시스템은 고장 발생 전 A에서 운전되고 있다고 가정한다. 고장 발생 직후 시스템의 단기 다이내믹스가 안정하고 빠르게 단기 부하특성(short-term load characteristic)을 따라 평형점 B로 수렴했다고 할 때, 시스템 부하는 원래의 부하(P_0)로 회복하려는 특성을 갖고 있으며 이를 나타내기 위해 증합형(additive) 또는 증배형 동적 부하 모델(multiplicative dynamic load model)을 이용한다[3]. 그림 1의 경우와 같이 부하회복에 의한 장기 동특성에 의하여 시스템 상태는 B에서 C로 이동하게 되며 장기 부하특성(long-term load characteristic)과의 교점이 존재하지 않을 경우 고장 후 네트워크 P-V곡선을 따라 E점으로 접근한다. 이 때 계속하여 부하회복이 진행될 경우 단기 부하특성과 네트워크 P-V 곡

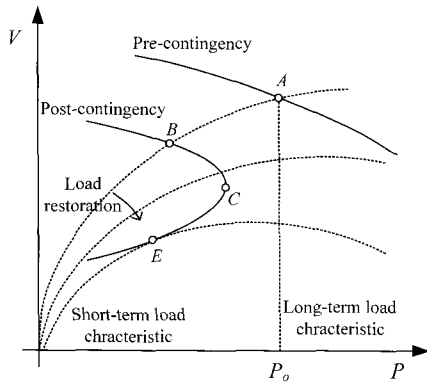


그림 1. 부하회복 특성에 의한 장기 불안정의 예.
 Fig. 1. An example of long-term instability by load restoration.

선의 교점이 하나만 존재하는 E점에 이르게 되며 이 때 기존의 준정적 해석의 자코비안은 특이성을 갖게 되어 부하회복이 더 진행될 경우 시스템의 해는 더 이상 존재하지 않게 된다.

[7]에서 제안한 CQSS는 다음과 같은 증합형 부하회복 모델을 재구성하여 이용하였다.

$$T_P \frac{d}{dt} P_r + P_r = P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \quad (8a)$$

$$P_d = P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} + P_r \quad (8b)$$

여기에서 P_r 은 유효전력 부하회복을 나타내며, T_P 는 본 모델의 시정수를 의미한다. 그리고 α_s 와 α_r 는 유효전력 부하의 각각 장기 및 단기 부하특성에 해당하는 전압의존성 지수를 표현한다. V 와 V_o 는 이 부하모델의 적용을 받는 모선의 전압과 고장 전 상태에서의 초기 전압에 해당한다. (8b)는 본 모델의 출력 방정식에 해당하며, P_d 및 $P_{d,o}$ 는 각각 해당 모선의 유효 부하와 초기 부하를 나타낸다.

(8)과 같이 고장 적용 후 장기 부하 특성과 단기 부하 특성에 의한 부하의 차이에 의하여 P_r 은 증가하기 시작하며 두 부하 특성이 같게 될 때까지 부하회복이 진행된다. CQSS에서는 이러한 부하회복을 시간적으로 변화하는 지수로 표현할 수 있다고 가정하여 다음과 같이 변형된 부하모델을 사용하여 구현하였다.

$$P_d = P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha(t)}, \quad \alpha_s \leq \alpha(t) \leq \alpha_r \quad (9)$$

여기에서 $\alpha(t)$ 는 (8)로 표현되는 원래의 부하회복 모델과 (9)의 모델에 의한 부하가 증가적인 값을 갖도록 각 스텝에서 다음과 같은 식으로 결정한다.

$$\alpha(t) = \log_{\left(\frac{V}{V_o} \right)} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} - 1 \right] e^{-\frac{(t-t_o)}{T_P}} \right\}, t > t_o \quad (10)$$

이러한 증합형 부하모델의 재구성 과정은 연속법 적용을 더 간단하게 하기 위함이며, CQSS에서 여러 모선의 유효부하 지수 중 하나를 선택하여 각 시모의 스텝에서 시스템

파라미터로 이용한다.

그러나 증합형 부하회복 모델 [9]을 이용할 경우 (8b)로 부하를 결정하기 때문에, P_r 이 어떠한 값으로 존재할 때 해당 모선의 단기 부하특성이 왜곡된다. 즉, P_r 은 그 자체로 정전력 부하 특성을 나타내므로, 이를 포함한 부하회복 과정에서 P_d 의 전압의존 지수는 더 이상 α_r 가 아니며 이보다 좀더 0에 근접해 있는 값을 갖게 된다. 특히, 장기 전압 불안정 현상을 모의할 경우 이러한 왜곡은 더욱 심화된다. 따라서 이를 해결하기 위해 다른 부하회복 모델이 필요하여 [10]에서 증배형 부하회복 모델을 제안하였으며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$T_P \frac{d}{dt} z_P = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - (1 + z_P) \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \quad (11a)$$

$$P_d = (1 + z_P) P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \quad (11b)$$

여기에서 z_P 는 유효전력에 대한 부하회복 파라미터를 나타내며 초기값은 0이다. (8)의 부하회복모델과는 달리 (11)의 증배형 부하회복모델은 부하회복 파라미터 z_P 가 증가하더라도 해당 부하의 전압의존 지수는 α_r 로 유지되므로 단기 부하특성의 왜곡을 발생하지 않는다. 무효전력 부하도 마찬가지로 다음과 같이 증배형 부하모델로 표현할 수 있다.

$$T_Q \frac{d}{dt} z_Q = \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_s} - (1 + z_Q) \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_r} \quad (12a)$$

$$Q_d = (1 + z_Q) Q_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\beta_r} \quad (12b)$$

여기에서 z_Q 는 무효부하의 부하회복 파라미터를 나타낸다. 그리고 T_Q 는 무효전력 부하회복 시정수이며, β_s 와 β_r 는 각각 무효전력 부하의 장기 및 단기 부하특성에 해당하는 전압의존성 지수를 의미한다. Q_d 및 $Q_{d,o}$ 는 각각 해당 모선의 무효 부하와 고장 전 상태의 초기 부하에 해당한다. 본 논문에서 제안하는 CQSS 해석 알고리즘에서 무효부하에 대한 회복 모델 적용은 유효부하의 경우와 같으므로 다음부터 유효부하 회복모델의 적용 부분만을 설명한다.

다음으로 본 논문에서 제안하는 증배형 부하회복모델의 CQSS에 대한 적용방법을 설명하고자 한다. 증배형 동적 부하모델을 포함하는 전력 시스템 방정식에 대하여 준정적 해석을 목적으로 하는 연속법을 적용하기 위해서는 하나의 시스템 파라미터를 추가해야 하여야 한다. 본 논문에서는 추가되어야 하는 시스템 파라미터로서 증배형 부하모델의 유효 부하회복 파라미터 중 하나를 선택한다. 이를 설명하기 위해 (11)에 해당하는 부하회복 모델을 적분 시간스텝(h)을 포함한 수치적분 형태로 간단한 Euler법을 이용하여 다음과 같이 대수화한 식을 살펴본다.

$$z_P^{(m+1)} = z_P^{(m)} h + z_P^{(m)} \quad (13a)$$

$$z_P^{(m)} = \frac{1}{T_P} \left(\left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_s} - (1 + z_P^{(m)}) \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \right) \quad (13b)$$

$$P_d^{(m+1)} = (1 + z_P^{(m+1)}) P_{d,o} \left(\frac{V}{V_o} \right)^{\alpha_r} \quad (13c)$$

여기서 위 첨자 m 와 $m+1$ 은 각각 m 번째와 $m+1$ 번째 시도의 스텝을 나타낸다. 실제적으로 본 논문이 제안하는 CQSS 해석에서는 (13a)와 (13b)를 (13c)에 포함시켜 부하로 전력 시스템의 네트워크 방정식에 포함시켜 이용한다. 따라서 네트워크 방정식 함수 $g(\cdot)$ 는 x , y 및 z 의 함수이다.

본 논문에서 제안하는 CQSS는 (11b)와 (12b)로 표현되는 유효 및 무효전력 부하를 해당 모선의 조류방정식에 다음과 같이 포함시켜 재구성한다. 재구성된 조류방정식 (모선 i)은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{Ti} + (1 + z_{Pi})P_{di,o}(V_i/V_{i,o})^{\alpha_{Pi}} - P_{Gi} &= 0 \\ Q_{Ti} + (1 + z_{Qi})Q_{di,o}(V_i/V_{i,o})^{\beta_{Pi}} - Q_{Gi} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 아래첨자 T, G는 각각 해당모선의 전력의 주입, 발전을 의미한다. 위 식은 (2) 즉 네트워크 방정식에 해당하는 대수방정식에 해당한다. 본 논문에서는 (11), (12)의 동적부하 모델을 포함하는 부하모선 중 현재 적분 스텝에서 가장 변하는 모델의 상태변수 z_P 를 선택하고 이를 시스템 변수로 추가한다. 즉, (13a)를 이용하여 다음 적분 스텝의 z_P 를 계산하므로 (13b)로 계산되는 현재 해에서의 z_P 의 1차 미분의 수치적 값이 가장 큰 부하모델의 상태변수를 시스템 변수 (z_{Pmax})로 선택하는 것이다.

그럼 예측과정에서 다음 해의 예측값을 결정하기 위한 현재 해에서의 tangent 벡터 $[dx \ dy \ dz_{Pmax}]^T$ 는 다음 식으로 구한다.

$$\begin{pmatrix} f_x & f_y & 0 \\ g_x & g_y & g_z \\ e_k^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz_{Pmax} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서 g_z 의 유효전력 및 무효전력 부분은 다음과 같은 값을 갖는다.

z_{Pmax} 에 해당하는 모선 i 의 경우,

$$\begin{aligned} g_{zP_i} &= P_{di,o}(V_i/V_{i,o})^{\alpha_{Pi}} \\ g_{zQ_i} &= (z_{Qi}/z_{Pi})Q_{di,o}(V_i/V_{i,o})^{\beta_{Pi}} \end{aligned} \quad (16a)$$

그 외의 모선 j 의 경우,

$$\begin{aligned} g_{zP_j} &= (z_{Pj}/z_{Pi})P_{dj,o}(V_j/V_{j,o})^{\alpha_{Pj}} \\ g_{zQ_j} &= (z_{Qj}/z_{Pi})Q_{dj,o}(V_j/V_{j,o})^{\beta_{Pj}} \end{aligned} \quad (16b)$$

(15)에서 f_z 요소가 0인 이유는 단기 다이내믹스에 대한 평형점 방정식은 부하회복 모델과 직접적인 관계성을 갖고 있지 않게 때문이다. 연속 파라미터는 이전 연속 스텝에서 결정된 tangent 벡터 성분 중 가장 큰 값을 갖는 변수 (k 번째 변수)가 선택되며, 연속 파라미터에 해당하는 e_k 벡터 성분을 1로 결정한다[8]. (15)로 계산된 tangent 벡터로 다음 스텝의 해의 예측값은 다음 식으로 결정한다.

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} x^*(m+1) \\ y^*(m+1) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x^{(m)} \\ y^{(m)} \end{pmatrix} + \sigma \begin{pmatrix} dx^{(m)} \\ dy^{(m)} \end{pmatrix} \\ \sigma &= \frac{z_{Pi}^{(m+1)} - z_{Pi}^{(m)}}{dz_{Pmax}} \end{aligned} \quad (17)$$

여기에서 σ 는 예측값을 의미하며, σ 는 스텝 크기를 나타낸다. (17)은 각 부하모델의 상태변수에 대한 예측은 포함하고 있지 않으며, 대신 주어진 h 를 가지고 일반적인 수치적분 형태인 (13a)를 이용하여 결정한다. 그리고 (17)의 아래 식과 같이 σ 를 이전 연속 스텝에서 선택된 z_{Pmax} 의 실제 증가값의 이에 해당하는 tangent 벡터 성분에 대한 비로써 결정한다. 수정과정에서는 (17)로 결정된 다음 해의 예측값으로부터 $m+1$ 번째 스텝에서의 정확한 해를 다음의 수정 방정식을 이용하여 구한다.

$$\begin{pmatrix} f_x & f_y & 0 \\ g_x & g_y & g_z \\ e_k^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z_{Pmax} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} f \\ g \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

(18)에서 이용되는 자코비안은 예측과정의 것과 같다. 수정과정에서 e_k 가 z_{Pmax} 이외의 변수가 선택되었을 경우, z_{Pmax} 의 값은 변할 수 있으며 이러한 현상은 J_{xy} 의 특이점 부근에서 발생된다.

IV. 사례 연구

본 논문에서 제안한 단기 부하특성의 왜곡이 없는 증배형 부하회복 모델을 포함한 CQSS 해석 알고리즘을 New England 39-모선 시스템 [11]에 적용한 결과를 설명하고자 한다. 그림 2에서 본 시스템의 단선도를 나타내고 있다. 시스템의 총 부하는 6998.8 [MW]이며, 각 부하모선에 (11)의 증배형 부하회복 모델을 적용되었다. 표 1에서 본 모의에서 이용된 부하모델 파라미터를 나타내고 있다.

New England 39-모선 시스템은 10기의 발전기를 포함하고 있으며, 본 모의에서는 발전기를 표현하기 위해 간략화된 조속기 모델과 IEEE DC-type I 여자기 모델을 포함한 이축 동기기 모델을 이용하였다. 본 논문에서 포함된 모델들은 문헌 [12]에서 자세히 설명하고 있다.

본 모의에서는 고장으로 선로 21-22의 탈락이 고려된다. 이 고장으로 인하여 각 모선의 전압이 감소하게 되어 평형점에 있던 (11), (12)의 부하모델의 유추량이 더 이상 0이 아니며 이에 따라 유효 및 무효 부하회복 파라미터인 z_P, z_Q 는 서서히 증가하기 시작한다. 그리고 이 파라미터들의 증

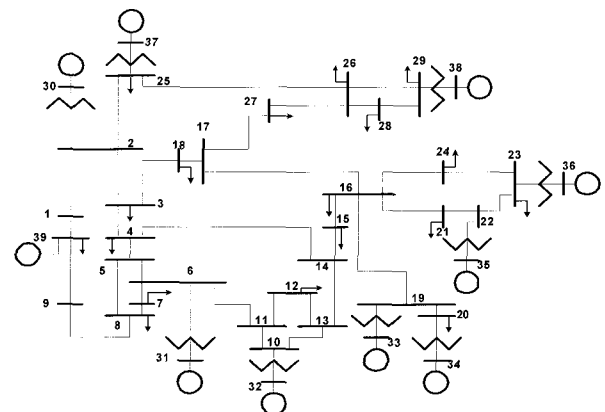


그림 2. 뉴잉글랜드 39모선 시스템의 단선도.
Fig. 2. One-line diagram of new england 39-bus system.

표 1. 동적 부하모델 파라미터.

Table 1. Model parameters for dynamic load models.

유효 전력	α_s	α_r	T_P
	0	1.5	200.0
무효 전력	β_s	β_r	T_Q
	0	1.8	160.0

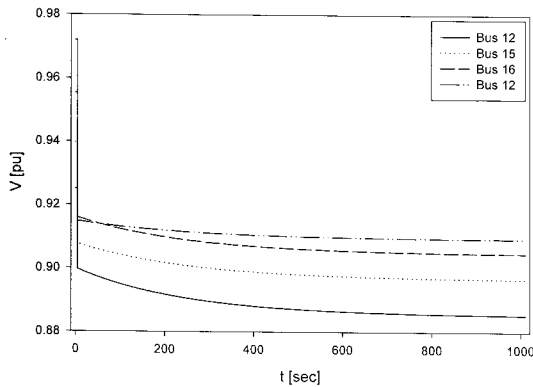


그림 3. CQSS(증배형 모델 포함)를 이용한 t-V 곡선.

Fig. 3. t-V curves using CQSS with the multiplicative load model.

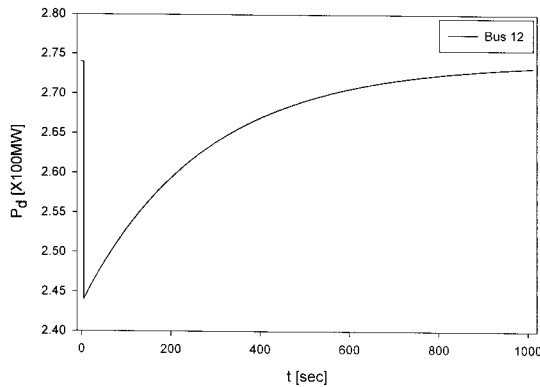


그림 4. 12번 모선의 유효 부하회복 곡선.

Fig. 4. Active load restoration curve of bus 12.

가로 해당 유효, 무효 부하 (P_d , Q_d) 역시 증가하게 된다. 이렇게 부하 회복이 진행되다가 모든 부하모델의 우측항이 0이 될 때 시스템은 또 다른 평형점에 이르게 된다. 만약 시스템의 부하 공급능력을 지나쳐서 부하회복이 수행될 때 시스템은 그림 1의 예와 같이 불안정 현상을 경험할 수 있게 된다.

그림 3은 증배형 부하모델을 포함시킨 CQSS를 이용하여 21-22 선로 탈락 고장을 5초에 적용했을 때 임의로 선택된 모선의 t-V 곡선을 나타내고 있다. 본 모의 결과를 통해 해당 고장은 시스템 불안정을 야기하지 않으나 모선 21의 경우 0.9 [pu] 이하의 전압을 경험하게 됨을 알 수 있다.

그림 4는 21, 22 선로 탈락 고장 시 모선 21에서 발생하는 부하회복 곡선을 나타내고 있다. 모선 21의 부하는 고장 적용 전 274[MW]이며, 고장 적용 후 244[MW]로 감소한 후 서서히 부하가 회복되며 약 1000초 경과 후의 부하는 273.25

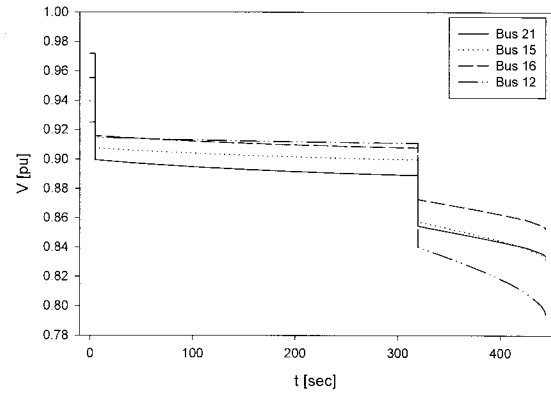


그림 5. 추가 고장 적용 시 t-V 곡선.

Fig. 5. t-V curves with the additional outage.

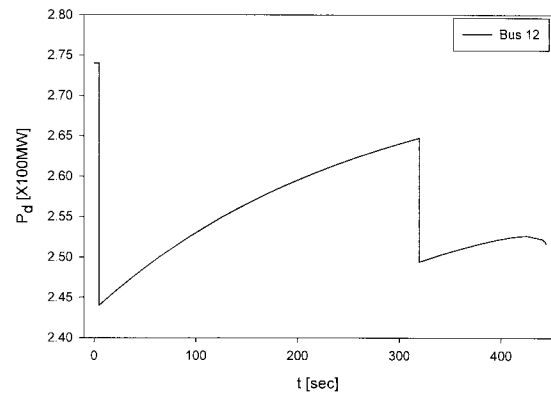


그림 6. 추가 고장 적용 시 12번 모선의 유효 부하회복 곡선.

Fig. 6. Active load restoration curve of bus 12 with the additional outage.

[MW]에 이르게 된다.

다음으로 5초에 21-22 선로 탈락 후 320초에서 모선 32의 발전기 탈락을 추가적으로 적용한 예를 설명한다. 본 모의의 목적은 증배형 부하회복 모델의 단기 부하특성이 계속 유지되고 있는 가를 확인하기 위함이다. 그림 5에서 추가적인 고장 적용 시 CQSS로부터 얻을 수 있는 선택된 4개 모선에 대한 t-V 곡선을 나타내고 있다. CQSS 적용 시 320초에서 추가적인 고장을 적용하였을 때 약 444초에서 tangent 벡터의 dz_{Pmax} 성분이 음(-)의 값을 갖게 되므로 이 부근에서 시스템이 준정적 해석 측면에서의 특이점을 경험하고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 6은 두 고장이 순차적으로 적용되었을 때의 모선 12의 부하곡선을 나타내고 있다. 모선 12의 부하는 첫 번째 고장 적용 후 244.03[MW]로 감소하고 서서히 두 번째 고장 적용 직전까지 264.74[MW]로 증가하다가, 두 번째 고장이 적용된 뒤 다시 249.42[MW]로 감소된 후 부하가 회복되다가 특이점 부근에서 252.18[MW]의 값을 갖게 된다. 표 2에서 초기 상태 및 각 고장 적용 후에서의 모선 21의 파라미터들을 나타내고 있다. 표 2의 마지막 열은 각 고장 적용 직후 (11b)으로부터 이끌어 낸 유효전력 부하의 단기적인 전압의존지수 α_T 의 값을 나타내고 있으며, 이는 표 1에서

표 2. 21번 모선의 초기 및 고장 적용 후 파라미터값.
Table 2. Bus 21's parameters at the initial and right after two outages.

시간 [sec]	전압 [pu]	P_d [pu]	z_p	$\alpha_T = \log \frac{P_d}{V_o (1+z_p) P_{do}}$
0	0.97187	2.74	0	
5+	0.89964	2.4403	0	1.499946739
320+	0.85449	2.4942	0.10415997	1.499991029

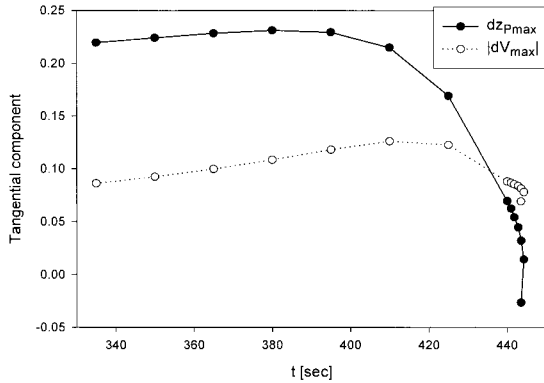


그림 7. 추가 고장 적용 후 dz_{Pmax} 와 dV_{max} .
Fig. 7. dz_{Pmax} and dV_{max} after the additional outage.

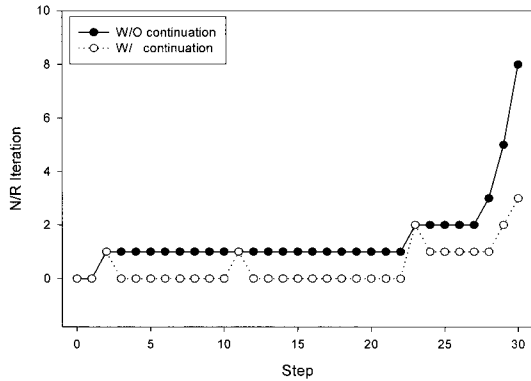


그림 8. 각 step에서의 newton 반복회수.
Fig. 8. Newton iteration number at each step.

의 α_T 의 값 (1.5)에 근접해 있다.

그림 7은 두 번째 고장 적용 후 CQSS의 예측과정에서 (15)를 이용하여 계산된 tangent 벡터 성분 중 dz_{Pmax} 및 $|dV_{max}|$ (가장 큰 값을 갖는 전압감도)를 나타내고 있다. 약 440초에서 dz_{Pmax} 가 $|dV_{max}|$ 의 값이 교차되어 연속 파라미터가 z_{Pmax} 에서 dV_{max} 에 해당하는 모선 전압으로 바뀌게 된다. 이로 인하여 CQSS는 J_{xy} 의 특이성을 성공적으로 회피할 수 있어 강건한 수렴성을 갖는다.

그림 8은 연속 파라미터가 바뀌기 전까지 기존의 QSS 알고리즘과 본 논문에서 개발한 증배형 부하모델을 포함한 CQSS 알고리즘의 각 스텝 (수정과정)에서의 Newton 반복 회수를 설명하고 있다.

기존의 QSS와 비교하여, CQSS는 예측과정에서 tangent 벡터를 구하기 위하여 수정과정에서 분해된 자코비안 행렬을 이용해 후위 및 전위 대입법을 추가적으로 수행한다. 이 과정은 행렬의 LU분해를 포함하고 있지 않아 1회의 N/R 반복보다 계산시간이 짧으나, 이를 1회 Newton 반복의 계산이 필요하다고 하자. 그림 8을 보면, 시스템이 심각한 상황에 있지 않을 때, CQSS는 대부분의 스텝에서 QSS보다 해를 구하기 위해 1회 적게 Newton 반복이 필요하다는 것을 알 수 있다. 이것은 CQSS의 예측과정이 수행되기 때문으로, 예측과정에서의 1회 반복을 고려할 경우 기존의 QSS와 비슷한 속도로 계산 수행이 가능하다는 것을 알 수 있다. 그러나 시스템이 준정적 특이점 부근에서 종래의 QSS의 경우 해를 구하기 위해 많은 Newton 반복이 필요하며 440초 이후 J_{xy} 의 특이성에 의하여 발산하여 해를 구할 수 없으므로, 특이점 부근에서는 CQSS를 적용하여 보다 효과적으로 해의 경로를 추적할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 기존에 CQSS에 적용된 증배형 부하회복 모델의 단기적 부하특성 왜곡의 문제점을 설명하고, 증배형 부하회복 모델을 CQSS에 적용하는 방안을 제시하였다. 이를 위해 연속법 적용에 반드시 필요한 추가적인 시스템 파라미터로서 증배형 부하회복 모델의 z_p 중 가장 크게 변하는 파라미터를 선택하였다. 본 논문에서 제시한 방법은 현재 스텝에서 다음 스텝의 해를 구하는 과정으로 증배형 부하회복 모델 자체를 변형하지 않고 기존의 QSS와 같이 일반적인 시적분법을 사용하며, 그 외의 변수에 대하여 tangent 벡터를 이용하여 다음 해를 예측하고 이로부터 수정과정을 통해 해를 구한다. 연속법을 적용한 CQSS는 시스템이 준정적 특이점 부근에서 보다 강인한 수렴성을 갖으며 연속 파라미터가 z_{Pmax} 에서 전압으로 바뀔 때 특이점 부근이라는 것을 보다 빠르게 인지할 수 있다.

참고문헌

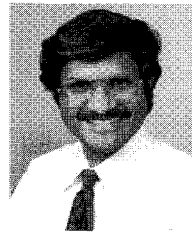
- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [2] C. Taylor, *Power System Voltage Stability*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] T. Van Cutsem, C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Boston: Kluwer Academic Publisher, 1998.
- [4] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziaargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
- [5] J. Y. Astic, A. Bihain, and M. Jerosolimski, "The mixed Adams-BDF variable step size algorithm to simulate transient and long term phenomena in power systems," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 2, May 1994.

- [6] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J. Marquet, and P. Pruvot, "A comprehensive analysis of mid-term voltage stability," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 10, no. 2, May 1995.
- [7] Q. Wang, H. Song, and V. Ajarapu, "Continuation-based quasi-steady-state analysis," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 21, no. 1, Feb. 2006.
- [8] R. Seydel, *From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis*, New York: Elsevier Science, 1988.
- [9] D. J. Hill, "Nonlinear dynamic load model with recovery for voltage stability studies," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 8, no. 1, Feb. 1993.
- [10] W. Xu and Y. Mansour, "Voltage stability analysis using generic dynamic load models," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 1, Feb. 1994.
- [11] K. R. Padiyar, *Power system dynamics*, Singapore: John Wiley & Sons (Asia), 1996.
- [12] V. Ajarapu, *Computational techniques for voltage stability assessment and control*, New York: Springer, 2006.



승 화 창

1997년 고려대 전기공학 졸업. 1999년 동 대학원 석사. 2003년 동 대학원 박사. 2005년~현재 군산대학교 전자정보공학부 조교수. 관심분야는 전력시스템 실시간 모니터링 및 최적화 응용.



Venkataramana Ajarapu

현재 아이오와 주립대 교수. 관심분야는 전력시스템 전압안정도 및 분기이론 응용.