

조속기 응답 조류계산 기반 장기 전압안정도 모의

송화창, 김영곤
서울산업대학교

이병준
고려대학교

Governor-Response Power Flow Based Long-term Voltage Stability Simulation

Hwachang Song, Young-Gon Kim
Seoul Nat'l Univ. of Technology

Byongjun Lee
Korea University

Abstract - This paper present a practical method for long-term voltage stability simulation based on a governor-response power flow. Governor-response power flow (GPF) is to model the long-term system response in the interval from 3 to 30 seconds after disturbance. In this paper, it is assumed that the GPF model can capture the system state before load restoration starts in contingent conditions. This paper discusses the applicability of GPF to long-term simulation for voltage stability analysis and then explains the GPF formulation and the procedure of the proposed simulation. In addition the paper includes the simulation results with the modified New England 39-bus system.

1. 서 론

최근의 전력계통은 송전계통의 확충적 어려움과 부하 집중 지역의 지속적인 소모 증가로 인해 안정도 한계에서 운전되고 있다. 이러한 상황에서 전압안정도는 운전의 한계를 결정짓는 주된 요소로 운전 및 계획 단계에서 필수적으로 고려되어야 한다. 현재까지 전압안정도 해석을 위해 다양한 방법론들이 제안되었으며 [1-4], 이 중 주어진 계통상태의 유효전력 여유 (active power margin)를 결정하는 PV 해석이 실제통에 많이 적용되고 있다. 이러한 PV 해석을 위해서는 부하증가 시나리오가 제공되어야 하지만 일반적으로 사용되는 부하증가 시나리오는 실제 계통의 부하증가와와는 다를 수 있으므로, 적절한 유효전력 여유의 최소값은 각 계통에 대하여 전압안정도 기준 (Voltage stability criteria)에 정의되어야 한다. 전압안정도 현상은 다양한 시간대 (time scales)의 동적현상을 포함하며 [1-4] 이에 대한 상세한 해석을 위해서는 장기 시모의 해석을 수행해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 조속기 응답 조류계산을 기반으로 하는 장기 전압안정도 모의 기법을 제안하고자 한다. 조속기 응답 조류계산은 계통 동요 후 약 3-30초 정도의 시간이 지난 시점에서의 계통 상태를 획득하기 위해 적용되고 있는 알고리즘이다 [6]. 제안하는 기법의 기본 아이디어는 고장 후 부하회복의 속도가 충분히 느린 계통의 경우 조속기 응답 조류계산 방식이 부하회복이 시작되는 시점 바로 전의 계통 상태를 나타낼 수 있다는 가정에서 출발하였으며 ULTC의 탭 변화에 의한 부하회복 모델을 사용하였다. 또한 제안하는 기법을 적용할 경우 발전기 탈락 등의 계통 고장의 경우 유효전력 균형 회복을 위한 조속기 동작을 고려할 수 있으며, 해당 고장에 대하여 어떠한 모션들이 저전압 및 이로 인한 부하회복을 경험하는 지에 대한 정보를 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 조속기 응답 조류계산 (GPF)

본 논문은 고장상태에서 연구 대상 계통의 부하회복 속

도가 충분히 느리다는 가정 하에 조속기 응답 조류계산 (GPF, governor-response power flow) 해를 고장 후 단기 평형점 (short-term equilibrium)으로 간주후 장기 전압안정도 모의를 수행한다.

그림 1은 조속기 응답에 따른 i 모선 발전기의 유효전력 출력의 변화를 설명하고 P_{gi} 및 P_{gsi} 는 i 모선 발전기의 유효발전 출력과 그 지정값이며, P_{maxi} 는 해당 발전기의 유효발전 출력의 최대값을 나타내고 R_i 은 해당 조속기의 속도조정률을 표현하고 있다. 그림 1과 같이 조속기는 시스템 주파수 변화 ($\Delta\omega$)를 입력으로 하여 P_{maxi} 및 R_i 에 의하여 출력을 변화시킨다.

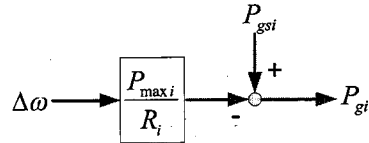


그림 1. 조속기 응답에 따른 유효발전력의 변화

Fig. 1. Active generation change by the governor response

조속기 응답 조류계산은 초기 조류해로부터 고장 발생시에 조속기 응답이 활성화된 발전기의 유효발전 출력을 그림 1과 같이 변화하도록 하여 그 해를 구한다. 따라서 조속기 응답을 고려한 i 모선의 조류방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{ti}(\delta, V) + P_{li}(V) - [P_{gsi} - \frac{P_{maxi}}{R_i}(\omega - \omega_0)] = 0 \quad (1.a)$$

$$Q_{ti}(\delta, V) + Q_{li}(V) - Q_{gi} = 0 \quad (1.b)$$

여기에서 아래첨자 t, l, g 는 각각 주입, 부하, 발전을 각각 나타낸다. δ 와 V 는 전압 위상각 및 크기를 표현하는 벡터이며, ω 와 ω_0 는 각각 [pu]으로 표현된 시스템 주파수 및 정상 주파수를 표현한다. 본 논문에서는 식 (1)의 전체 조류방정식을 뉴턴-랩슨법에 적용하여 해를 구한다.

	δ_1	δ_2	...	δ_{n-1}	V_1	V_2	...	V_m	ω
P_1	H	N	K	M	L	M	M	M	M
P_2									
\vdots									
P_n									
Q_1	J	L	M	M	L	M	M	M	
Q_2									
\vdots									
Q_m									

그림 2. 조속기 응답 조류계산의 자코비안 행렬 구조
Fig. 2. Structure of the Jacobian matrix for GPF

그림 2는 조속기 응답 조류계산의 자코비안 행렬의 구조를 설명하고 있다. 조속기 응답 조류계산에서는 슬랙 모션은 필요하지 않으나, 대신 어떤 발전기의 모션 전압 위상각이 기준 위상각인 지를 지정해야 하며 이 위상각은 상태변

수에서 제외된다. 본 논문에서는 기준 위상각 모선이 모선 번호 재배열을 통해 n 번째 모선에 위치하고 있으며 $m+1$ 번째 모선부터 $n-1$ 번째까지 전압 제어능력을 상실하지 않는 발전기 모선이 배치되어 있다고 가정한다. 그림 2에서 H, N, J, L 부행렬 (submatrix) 들은 일반적인 조류계산에서 이용하는 전력조류 자코비안 행렬과 크게 다르지 않으며 K 와 M 은 각각 ω 에 대한 유효 및 무효전력 조류계산방정식의 자코비안 성분배에 해당한다. 식 (1)에서와 같이 M 은 0이며, K 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$K_i = \begin{cases} P_{\max i} / R_i, & i \in SA \\ 0, & i \in SN \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)에서 SA 는 발전기 모선 중 조속기 응답이 가능한 모선들의 집합을 의미하며, SN 은 부하모선을 포함한 조속기 응답이 가능하지 않은 모선들의 집합을 나타낸다.

조속기 응답 조류계산은 초기 조류해로부터 슬랙 모선 및 모든 발전기 모선의 유효 발전량을 계산하여 P_{gsi} 를 초기화한 후 고장을 적용하고 식 (1)을 이용하여 전력조류 mismatch를 계산한 후 그림 2의 자코비안을 이용한 수정방정식을 구성하여 각 상태변수의 수정값을 구하고 해를 갱신하는 절차를 반복함으로써 전체 모선의 전력조류 mismatch를 수렴허용 한계 내에 존재하도록 하는 해를 구한다. 개발된 조속기 응답 조류계산은 각 발전기의 무효전력 발전 제약에 따른 발전기 단자 전압 제어능력의 상실 여부를 고려하는 알고리즘을 포함하고 있다.

3. GPF 기반 장기 전압안정도 모의

조속기 응답 조류계산을 기반으로 주어진 계통의 장기 전압안정도 모의에 대해 설명하고자 한다.

3.1 ULTC 모델

준정적 시도의 기법 [5]이 계통에 포함된 ULTC 들의 전압분포에 따른 응답과 식 (3)과 같은 이산적인 탭 변화 시간에 의하여 모의 시간 스텝을 결정하는 방식을 본 논문에서 제안하는 알고리즘에 같은 방식으로 적용하였다. 다음 식 (3)은 이산적인 탭 응답을 갖는 ULTC 모델 [5]로 본 논문에서 적용하였다.

$$r_{k+1} = \begin{cases} r_k + \Delta r, & V_s > V_{s0} + d \text{ and } r_k < r_{\max} \\ r_k - \Delta r, & V_s < V_{s0} - d \text{ and } r_k > r_{\min} \\ r_k, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기에서 k 와 $k+1$ 는 각각 k 번째 및 $k+1$ 번째 모의 스텝을 의미하며, r 과 Δr 는 각각 해당 ULTC 탭 비(ratio)와 탭 이동 스텝을 나타낸다. 식 (3)에서 V_s 와 V_{s0} 는 각각 ULTC 2차측 전압크기와 그 지정값을 의미하며, d 는 탭변화가 발생되지 않는 전압범위의 상하한 편차 (deviation)를 표현한다. r_{\max} 와 r_{\min} 은 각각 해당 ULTC의 탭 비의 상하한 값을 나타낸다. 위 모델을 적용하기 위해서는 식 (3)의 파라미터와 함께 ULTC 응답의 초기 시간지연 (T_{d0}) 및 시간지연 (T_d)에 대한 데이터가 추가적으로 필요하다.

3.2 부하모델

본 논문에서 적용된 부하모델은 다음과 같은 지수형 모델을 적용하였다.

$$P_{di} = P_{d0i} (V_i / V_{d0i})^{\alpha_i} \quad (4.a)$$

$$Q_{di} = Q_{d0i} (V_i / V_{d0i})^{\beta_i} \quad (4.b)$$

여기에서 P_{d0i} 와 Q_{d0i} 는 각각 i 모선의 전압이 초기값 V_{d0i} 에 있을 때 유효 및 무효부하를 나타내며, α_i 와 β_i 는 각각 유효 및 무효부하의 전압 의존도 (voltage dependency)를 나타내는 지수이다. 계통 동요 시 전압이 감소할 경우 식 (4)에 의하여 부하는 변화하게 되며 2차측 전압을 유지하려고 하는 ULTC 동작에 의하여 고장 전의 부하수준으로 돌아가려고 하는 부하회복 (load restoration)을 경험하게 된다.

3.3 전체 모의절차

그림 3은 본 논문이 제안하는 알고리즘의 전체 모의절차를 나타내고 있다. 절차를 간단하게 설명하면, 먼저 주어진 계통 데이터를 이용하여 초기조류계산을 수행한 후 각 발전기의 원동기 발전 지정값 (P_{gs})을 초기화한다. 그리고 해당 상정고장을 적용하고 조속기 응답 조류계산을 이용하여 고장 후 단기적인 평형점을 근사적으로 구한다. 그리고 ULTC 탭변화 및 다른 계통 요소들에 대한 스위칭 발생 시간에 이르게 되면 이를 적용하고 GPF를 수행한다. 다음으로 ULTC 중 현재 시간으로부터 가장 빠르게 동작하는 것을 선택하고 탭변화 발생 최소 시간 (h)를 결정한 후 모의 시간을 h 만큼 증가시킨 후 다시 조속기 응답 조류계산을 수행한다. 만약 탭변화가 발생되지 않을 경우에는 이전 모의 스텝의 h 를 이용한다. 이러한 절차를 계속 반복하다가 모의 시간이 종료 시간 (t_{END})을 지나면 결과를 출력하고 프로그램을 종료한다.

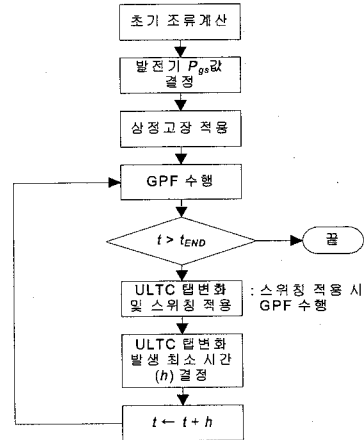


그림 3. 제안 알고리즘의 전체 모의절차
Fig. 3. Overall procedure of the proposed algorithm

4. 사례연구

이번 장에서는 제안한 모의 알고리즘을 수정된 뉴잉글랜드 39 모선 시험계통에 대하여 적용한 예를 설명한다. 시험계통 데이터의 총 부하는 7219.99 [MW]이며, 발전기 10기에서 총 7223.78 [MW]의 유효전력을 공급하고 있다. 모의를 위해 문헌 [12]에서 이용한 네트워크 데이터에서와 같이 모든 부하모선을 ULTC를 포함한 등가적인 부하모델로 변환하였다. 모든 부하의 전압의존 지수 α_i 와 β_i 는 1.5 값을 사용하였으며 표 1에서는 본 사례연구에서 적용된 ULTC의 탭 동작 파라미터를 나타내고 있다. T_{d0} 및 T_d 의 값이 모두 100.0 [s]로 부하회복이 조속기 응답에 비하여 충분히 느린 값을 갖도록 하였다.

그림 4는 1초에 32번 모선 발전기를 탈락시켜 계통의 유효전력 발전량을 감소시키도록 한 후 조속기 응답 조류계산 기반 모의법을 적용한 결과를 나타내고 있다.

표 1. 모의를 위한 ULTC 파라미터
Table 2. ULTC parameters for simulation

V_{s0} [pu]	d [pu]	r_{\max}	r_{\min}	Δr	T_{d0} [s]	T_d [s]
1.050	0.060	1.1	0.8	0.00625	100.0	100.0

그림 4에서 선택된 모선에 해당하는 모선 104, 107, 108, 118, 120은 각각 모선 4, 7, 8, 18, 20의 ULTC 2차측 모선을 의미한다. 고장 적용 후 약 1100 [s]가 지난 후 ULTC 동작이 더 이상 발생하지 않았으며, 31번과 30번 모선의 발전기들은 각각 401 [s], 601 [s]에서 무효전력 발전 상한을 경험하여 더 이상 해당 발전기 단자전압에 대한 제어능력을 상실하였다. 그림 4로부터 상정고장 적용 후 모선에 따라 전압감소의 폭이 다르며, 이에 따라 부하회복의 정도 또한 다르다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 본 모의 결과로부터 작성된 시간에 따른 부하회복 곡선을 나타내고 있으며, 모의

종료 시 전체부하는 7231.97 [MW]로 초기값보다 약간 높은 값을 보이고 있다.

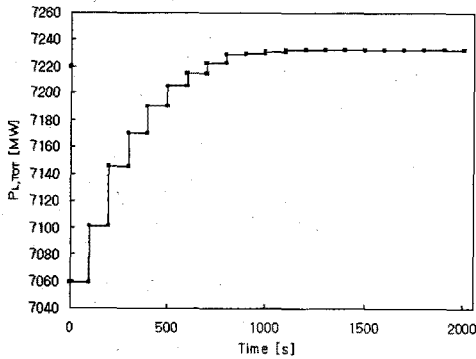


그림 4. t-v 곡선 (32번 모선 발전기 탈락)
Fig. 4. t-v curves (generator trip at bus 32)

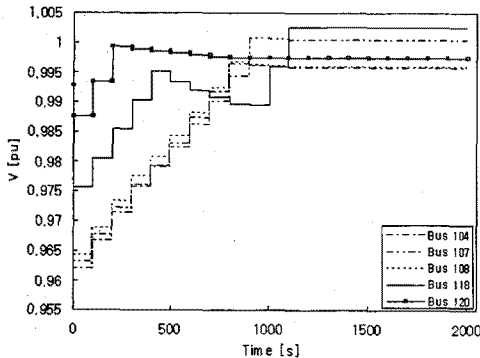


그림 5. 전체 부하회복 곡선 (32번 모선 발전기 탈락)
Fig. 5. Total load restoration (generator trip at bus 32)

다음으로 추가적으로 21-22 선로를 1001 [s]에 탈락시켰을 때 조속기 응답 조류계산 기반 모의 알고리즘으로 계통의 응답을 구하였다. 그림 6은 시간에 대한 선택된 ULTC 2차측 모선들의 전압 곡선을 나타내고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 30번과 31번 모선의 발전기는 1000 [s] 이전에 무효전력 한계에 이르게 되며, 추가적인 상정고장에 의하여 약 1001 [s]에 33번과 34번 모선의 발전기가 전압제어능력을 상실하게 되며 약 1901 [s]에 35번 및 36번 모선의 발전기가 무효전력 한계를 경험하게 된다. 이러한 결과로 약 2001 [s]에 발생된 추가적인 램동작에 의하여 계통은 GPF 발산을 경험하게 된다.

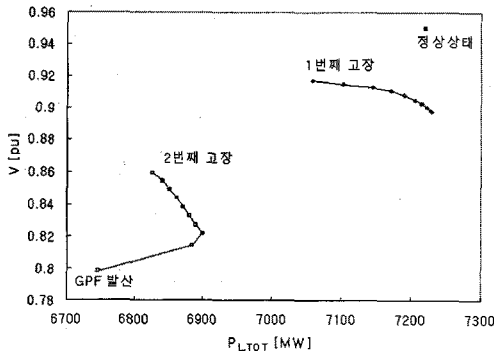


그림 6. t-V 곡선 (21-22 선로 추가 탈락)
Fig. 6. t-V curves (additional trip of line 21-22)

그림 7은 본 모의의 결과로 얻을 수 있는 정상상태, 1번째 고장 및 2번째 고장 상태에서의 P-V 곡선을 나타내고 있다. 1번째 고장상태에서 계통은 정상상태에서의 원래 부하수준을 회복할 수 있었으나, 추가적으로 적용된 2번째 고장상태에서는 계통의 부하공급능력이 원래 부하수준에 약 320 [MW] 정도 낮게 나타났다.

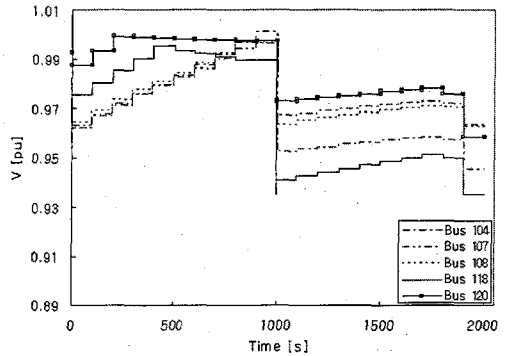


그림 7. P-V 곡선 (21-22 선로 추가 탈락)
Fig. 7. P-V curves (additional trip of line 21-22)

5. 결 론

본 논문에서는 조속기 응답 조류계산을 기반으로 한 장기 전압안정도 모의 알고리즘을 설명하였다. 조속기 응답 조류계산은 부하회복의 시정수가 충분히 느린 계통에 대하여 조속기 응답 조류계산이 계통의 단기 운전점을 근사적으로 결정하는 데 적용 가능하다는 기본 전제 하에서 논문을 전개하였으며 제안하는 알고리즘은 조류계산 데이터, 조속기 응답에 관한 기본적인 데이터, 그리고 ULTC 관련 데이터만을 필요로 한다. 또한 전압/무효전력 측면에서 계통 장기적인 응답 특성에 대한 이해를 돕는 실용적인 해석 도구로 적용 가능할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Taylor, *Power System Voltage Stability*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1644, Dec. 1987.
- [2] T. Van Cutsem and C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
- [3] IEEE Power System Stability Subcommittee, *Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*. IEEE Product no. SP101PSS.
- [4] V. Ajjarapu, *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and control*, New York: Springer, 2006.
- [5] T. Van Cutsem, Y. Jacquemart, J. Marquet, and P. Pruvot, "A Comprehensive analysis of mid-term voltage stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, May pp. 1173-1182, May 1995.
- [6] M. Lotfalian, R.A. Schlueter, D. Idizior, P. Rusche, S. Tedeschi, L. Shu, and A. Yazdankhah, "Inertia, Governor, and AGC/Economic Dispatch Load Flow Simulations of Loss of Generation Contingencies," *IEEE Trans. PAS*, vol. 104, no. 11, pp. 3020-3028, Nov. 1985.