

재경계통에 대한 2차 전압제어 시모의 모델 적용

송화창 이병준 이흥재 양병모 송인준⁺
 군산대 고려대 광운대 한전 전력연구원

Application of a Secondary Voltage Regulation Model to the KEPCO Metropolitan System

Hwachang Song Byongjun Lee Heungjae Lee Byong-Mo Yang In-Jun Song⁺
 Kunsan National University Korea University Kwangwoon University KEPRI

Abstract - This paper reports the results of time-domain simulation for the KEPCO metropolitan system with a secondary voltage regulation (SVR) model, developed with TSAT user defined model blocks. The previously proposed model in the literature needs switching blocks for converting level signals generated by a regional voltage regulator (RVR) into settings of reactive generation. This paper modified the SVR model not to incorporate the switching blocks, so it is much easier to implement the modified model on the simulation tool.

는 음(-) 상태에서 지속적으로 존재할 경우 q 신호 ($-1 \leq q \leq 1$)는 급증하거나 급감하게 된다.

이러한 q 신호를 입력으로 하여 PQR (Plant Q Regulator)에서 각 발전기의 무효전력 출력을 제어한다. q 신호가 양 (+)일 경우는 해당 발전기의 무효전력을 네트워크로 $q \times Q_{GM}$ 의 값으로 무효전력 출력 지정치가 결정되며, 음 (-)인 경우는 $-q \times Q_{GM}$ 의 값으로 결정된다. 여기에서 Q_{GM} 과 Q_{gm} 은 각각 해당 발전기의 무효전력 상한한 값에 해당한다.

PQR은 q 신호로 결정된 무효전력 출력 지정값과 실제 발전기의 무효전력 출력과 비교하고 이 에러를 줄이는 제어 블록을 포함하며 위 그림에서와 같이 적분기로 구성되어 있다. 이 적분기의 출력, PQR의 출력은 발전기 AVR의 에러 입력단의 하나의 신호로 포함되어, AVR의 V_{ref} 을 변화시킴으로써 해당 발전기의 무효전력 출력을 제어하는 형태로 적용된다.

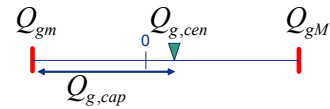
1. 서 론

2차 전압제어 (SVR, Secondary Voltage Regulation)는 1970년대 후반에 프랑스 EDF에서 계통 전압수준 향상을 목적으로 계통에 처음 적용되었으며, 현재 이태리 ENEL (CESI)에도 적용되어 많은 계통 운용경험이 축적되고 있다. SVR은 전압제어지역에 상당히 의존적이며, 송전망 확충 등 계통 변화에 따라 전압제어지역이 변동되는 문제점을 보완하기 위해 CSV (Coordinated SVR)의 개념이 도입되었고, SVR의 상위 개념에 해당하는 국가적인 계통에 대한 전압 수준을 제어하는 TVR (Tertiary Voltage Regulation) 까지 적용되고 있다.

본 논문은 기존의 SVR 모델의 스위칭 블록을 제거하여 더 간단히 적용될 수 있는 SVR 모델을 제안하고 이를 Powertech Lab.의 TSAT 사용자 정의 모델로 구현하여, 4개 전압제어 지역에 대한 SVR 모델을 포함한 재경계통의 시모의 해석에 적용하였다. TSAT은 일반적으로 이용되는 PSS/E 패키지의 전력계통 과도안정도 해석 프로그램과는 달리 SI (Simultaneous Implicit) 적분법을 이용하고 있고 가변적인 시적분 스텝이 적용 가능하므로 장기 시모의에 가장 큰 문제가 되는 수치적인 불안정을 최소화할 수 있는 특징을 가지고 있다.

2.2 제안 모델

그림 1의 모델을 직접적으로 TSAT에 적용할 때 어려운 점이 존재한다. 바로 그것은 q 신호의 부호에 따라 곱해지는 발전기 무효전력 상한한 값이 다르다는 점이다. 본 연구에서는 이러한 어려운 점을 해결하기 위해 무효전력 상한한 값의 중간 값을 의미하는 $Q_{g,cen}$ 과 $Q_{g,cap}$ 의 개념을 도입하였다. 그림 2에서 이 두 파라미터의 개념을 설명하고 있다.



〈그림 2〉 $Q_{g,cen}$ 과 $Q_{g,cap}$ 의 개념

위 그림에서 $Q_{g,cen}$ 은 무효전력 상한한 값의 중간 값을 의미하며, $Q_{g,cap}$ 는 $Q_{g,cen}$ 으로부터 무효전력 상한 또는 하한값까지의 차를 의미한다. 즉 q 신호가 0인 경우, 해당 발전기의 PQR의 무효전력 출력 지정치는 $Q_{g,cen}$ 에 해당하고, 양(+)의 값을 갖는 경우나 음(-)의 값을 갖는 경우는 다음 식을 이용하여 무효전력 출력 지정치를 결정한다.

$$Q_{g,ref} = Q_{g,cen} + q Q_{g,cap} \quad (1)$$

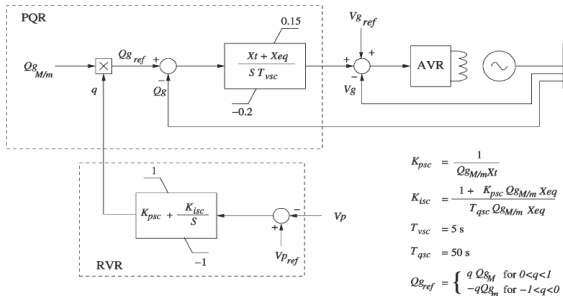
위 식을 이용할 경우 그림 1의 SVR 제어 블록 구조를 스위치의 사용 없이 TSAT 사용자 정의 모델로 구현할 수 있게 된다.

TSAT의 사용자 정의 모델은 두 가지 형태로 구현가능하다. 첫 번째는 TSAT 자체에서 제공하는 표준 제어블록의 조합으로 구현하는 것이며, 두 번째는 사용자가 직접 제어 모델을 C언어로 구현하여 DLL의 형태로 TSAT과 연계하는 방법이다. 아주 복잡한 형태의 모델을 구현할 때는 두 번째 방법이 적당하나, 일반적인 모델 구현에는 간단한 첫 번째 방법을 이용하는 것이 더욱 효율적이다. 본 연구에서도 표준 제어 블록의 조합으로 SVR의 모델을 다음 그림과 같이 구현하였다.

2. SVR 모델

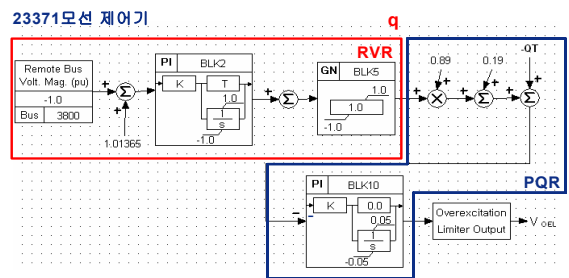
2.1 SVR 안정도 해석 모델

그림 1는 안정도 해석에서 적용되는 SVR 제어 블록 모델을 나타내고 있다 [1]. 이를 살펴보면, 하나의 전압제어 지역의 pilot 모선의 전압 (V_p)을 측정하고 이를 해당 지역의 pilot 모선 전압의 지정값 (V_{pre})과 비교하고 에러 신호를 생성한다.



〈그림 1〉 SVR 제어 블록

그리고 이 에러를 줄이기 위해 RVR (Regional Voltage Regulator)는 해당 지역 전압제어에 참여하는 발전기들에게 무효전력 출력 레벨 신호 (q)를 생성하여 제공한다. 이 때 적용되는 제어 형태는 PI (Proportional and Integral) 제어에 해당한다. 따라서 에러가 양(+) 또



〈그림 3〉 TSAT SVR 모델의 예 (20122 모선 발전기)

TSAT에서는 발전기의 a) 여자 시스템, b) PSS, c) UEL, d) OEL e) 원동기 및 조속기 등의 모델에 대한 출력 인터페이스를 제공하고 있으나, 그 외의 제어 모델에 관한 출력 인터페이스를 제공하지 않고 있다. 그림 1의 SVR 모델에서 PQR의 출력 신호는 여자의 전압 에러 생성부로 입력되므로 PQR의 출력 인터페이스로서 PSS, UEL, OEL의 것을 대체하여 사용할 수 있다. 연구에서는 그림 3에서와 같이 SVR 안정도 해석 모델의 출력 Interface로서 OEL의 출력단을 이용하였다.

3. SVR 모델을 포함한 재경계통의 TSAT 시도의 환경 구축

본 연구에서는 다음과 같은 순서로 재경계통에 대한 SVR의 사용자 정의 모델을 개발하였다.

1. 파라미터 결정: $X_t, X_{eq} \rightarrow K_{psc}, K_{isc}$
2. PQR 모델 구축
3. RVR 모델 구축

SVR 모델을 구현하기 위해 가장 중요한 것은 RVR, PQR의 제어 블록의 상수를 결정하는 것이다. 즉 이들 상수는 그림 1에서와 같이 X_t, X_{eq} 및 Q_{gm}, Q_{gm} 등으로부터 의존적이므로 이 파라미터들을 먼저 결정해야 한다. 제어 블록 상수 결정 후에 TSAT의 UDM 에디터를 사용하여 PQR 모델과 RVR 모델의 순서로 사용자 정의 모델을 구축한다.

SVR 모델 개발에 꼭 필요한 파라미터 중 X_t 는 제어 참여 발전기의 Step-up 변압기의 리액턴스 값을 나타내며, X_{eq} 는 해당 발전기의 Step-up 변압기의 고전압측 모선으로부터 pilot 모선까지의 등가 리액턴스를 의미한다.

본 연구에서는 B 행렬을 이용하여 이를 축약함으로써 X_{eq} 를 결정하는 방법을 사용하였다. 간략화된 전압과 무효전력 관계는 다음과 같이 B 행렬을 이용하여 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_{ij} \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{ij,ij} & B_{ij,N} \\ B_{N,ij} & B_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_{ij} \\ \Delta V_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기에서 모선 i 와 j 는 X_{eq} 를 구하기를 원하는 모선들에 해당한다. 아래첨자 N 은 그 외의 모선들을 의미한다. 만약 필요한 모선의 모선들에 대한 무효전력 주입의 변화가 존재하지 않는다면, ΔQ_N 은 0으로 놓을 수가 있으며, 이로부터 Kron 축약을 통해 모선 i 와 j 의 전압-무효전력 관계를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta Q_{ij} = [B_{ij,ij} - B_{ij,N} B_{N,N}^{-1} B_{N,ij}] \Delta V_{ij} \quad (3)$$

여기에서 이 축약된 행렬을 \bar{B}_{ij} 로 정의하면 이를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{B}_{ij} = \begin{bmatrix} B_{i,i} & B_{i,j} \\ B_{j,i} & B_{j,j} \end{bmatrix} \quad (4)$$

\bar{B}_{ij} 의 비대각 요소에 해당하는 $B_{i,j}$ 와 $B_{j,i}$ 로부터 역수의 절대값을 취하여 X_{eq} 를 구할 수 있으며, 이 두 값 중 적절한 것을 선택한다. 본 연구에서는 두 값중 큰 값을 X_{eq} 로 취하였다.

식 (4)로 계산된 X_{eq} 과 X_t 값을 이용하여 재경계통에 대한 SVR의 상수 (K_{psc}, K_{isc})가 결정되며, 이를 위해 다음과 같은 식이 이용된다.

$$K_{psc} = \frac{1}{Q_{cap} X_t} \quad (5a)$$

$$K_{isc} = \frac{1 + K_{psc} Q_{cap} X_{eq}}{T_{qsc} Q_{cap} X_{eq}} \quad (5b)$$

$$T_{vsc} = 5s, T_{qsc} = 50s \quad (5c)$$

다음으로 SVR 모델 적용 시 필수적으로 고려되어야 하는 사항은 q 신호의 초기화이다. RVR에서 생성되는 q 신호는 PI 제어 블록을 통과하고 그 값이 -1에서 1로 제한되어야 하므로 q 신호의 초기값 또한 이 범위 내에서 존재해야 한다. 그리고 시도의 해석 시 q 신호로부터 결정되는 $Q_{g,ref}$ 값은 초기값이 실제 무효전력 발전량과 같아야 어떠한 운전점에서 모의를 시작할 수 있다. TSAT 수행 초기 단계에서 이용되는 미분방정식 Mismatch에 대한 초기 허용값은 약 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 이다.

4. 시도의 결과

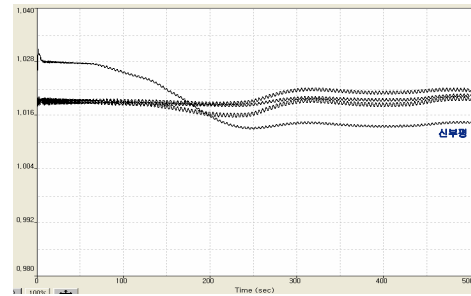
본 절에서는 앞에서 설명한 SVR 모델을 재경계통에 포함시킨 후 TSAT 시도를 통해 얻어진 결과를 설명하고자 한다. 해석 대상계통은 2006년도 철두부하 계통이며, 본 계통에 대한 조류계산 후 총 부하는 57549.6 [MW]이고 총 발전은 58394.0 [MW]이다.

본 모의에서는 재경계통에 해당하는 4개의 전압제어지역 [2]에 대하여 SVR를 적용하였다. 적용된 SVR 모델의 PQR 출력의 상하한 값을 0.025, -0.025로 설정하였으며, 표 1에서 나타나고 있는 바와 같이 각 지역의 pilot 모선의 전압 지정값을 설정하였다.

〈표 1〉 각 지역의 pilot 모선의 지정전압

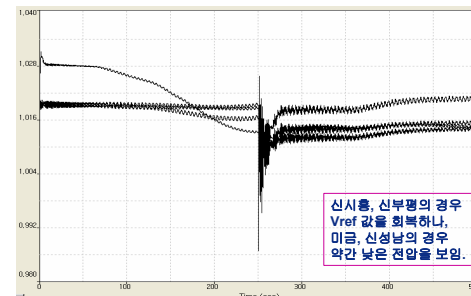
지역	모선번호	모선이름	Vref_pilot
8	3600	신시흥	1.02067
9	1700	미금	1.0194
10	4500	신성남	1.02117
12	3800	신부평	1.01365

먼저 고장을 적용하지 않고 4개의 지역에 대한 SVR 모델 적용 후 pilot 모선의 전압을 살펴보았다. 다음 그림은 t-V 곡선을 나타내고 있다. SVR 적용 후 계통 전압은 응동하기 시작하며 최종적으로 신성남, 미금, 신시흥, 신부평의 순서로 해당 pilot 모선의 지정값으로 접근하고 있음을 알 수 있다.



〈그림 4〉 재경계통 SVR 적용 (고장 적용하지 않음)

다음으로 화성-아산 2회선 고장을 약 250초 부근에서 적용한 결과를 설명하고자 한다. 다음 그림은 4개의 지역에 대한 SVR 제어 수행하면서 해당 고장 적용하였을 경우 TSAT에 의한 t-V 곡선을 나타내고 있다.



〈그림 5〉 재경계통 SVR 적용 (화성-아산 고장 적용)

고장 적용 후 신시흥, 신부평의 경우 모선전압의 pilot 모선 지정 전압값으로 회복하나 미금, 신성남의 경우 약간 낮은 전압을 나타내고 있다. 그 이유는 지역 8 (신시흥)과 지역 12 (신부평)의 경우 어느 정도의 무효전력원을 확보하고 있으나, 지역 9 (미금)와 지역 10 (신성남)의 경우 상대적으로 무효전력 공급원이 부족함에 따른 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 SVR의 TSAT 사용자 모델을 구축하여 이를 재경계통의 4개의 전압제어 지역에 대하여 적용한 시도의 해석에 적용하였다. 본 논문에서 적용한 SVR 모델은 RVR에서 생성되는 q 신호를 무효전력 제어 신호로 변환할 때 스위칭을 포함하지 않아, SVR의 사용자 모델 구축 시 보다 더 쉽게 구현할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] C. A. Canizares, C. Cavallo, M. Pozzi, and S. Corsi, "Comparing secondary voltage regulation and shunt compensation for improving voltage stability and transfer capability in the Italian power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 73, 2005, pp. 67-76.
- [2] CESI, *Feasibility study of the automatic voltage control of the KEPCO transmission grid*, Intermediate Report, 2006.