

Development of RTDS-MATLAB Integrated Simulation Environment for Development and Verification of Voltage Measurement based CVR Control Algorithm

전압계측기반 CVR제어 알고리즘 개발 및 검증을 위한 RTDS-MATLAB 연동 시뮬레이션 환경 개발

Seok-II Go*, Seon-Ju Ahn*†, Joon-Ho Choi*, Won Nam-Koong**, Chang-Hoon Shin**
고석일*, 안선주*†, 최준호*, 남궁원**, 신창훈**

* Department of Electrical Engineering, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Korea

** KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

† sjahn@jnu.ac.kr

Abstract

CVR is a technique for reducing power consumption by reducing the voltage of the system and many demonstrations and studies have been conducted in the past. Recently, SCADA-based or AMI-based VVC have been developed and the CVR is used as an important operation mode. Using a variety of instruments, CVR determines the optimal VVC control references by closed loop control. In this paper, we implemented RTDS-MATLAB integrated simulation environment for development and verification of CVR control algorithm based on voltage measurement. The voltage control device of distribution system was modeled using RTDS and MATLAB has constructed a controller that can measure and control the voltage of the simulation system of RTDS. After the capacitor, which is a reactive power control device, flattens the voltage of the system, the control algorithm reduces the voltage of the system by tap control of the OLTC based on the flatten voltage. The proposed system was verified by simulations.

CVR은 계통의 전압을 감소시켜 소비 전력을 줄이는 기술로, 과거 많은 실증과 연구가 진행되어 왔다. 최근, SCADA 기반 또는 AMI 기반의 VVC가 개발되면서 CVR이 중요한 운영 방식이 되었다. CVR은 다양한 계측기를 사용하여 폐루프 제어(closed loop control)방식으로 최적 VVC제어 지령치를 결정한다. 본 논문에서는 전압 계측기반 CVR제어 알고리즘 개발 및 검증을 위한 RTDS-MATLAB 연동 환경을 구현하였다. RTDS를 이용하여 배전 계통의 전압제어기기들을 모델링하고 MATLAB으로 RTDS의 모의 계통의 전압을 계측하고 제어할 수 있는 제어기를 구성하였다. 무효전력 제어기기인 캐패시터는 계통의 전압을 평탄화하고 계통의 전압 기반으로 OLTC의 탭 제어를 하여 계통의 전압을 낮추는 제어 알고리즘을 MATLAB을 통해 구현하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 시스템을 검증하였다.

Keywords: CVR (Conservation Voltage Reduction), RTDS (Real Time Digital Simulator), VVC (voltage-Var control)

I. 서론

CVR (Conservation Voltage reduction)은 1950년대부터 미국의 전력회사들이 수행했던 에너지 소비를 줄이기 위한 기술로[1], 계통의 전압을 감소시켜 계통의 전력 소비를 줄이는 기술이다. 1973년 오일파동이 발생했을 때 광범위한 CVR 실증 이후에 많은 전력 회사들이 각 회사들의 CVR 실증을 수행하였으며, 1980년과 1990년대에 상당히 많은 CVR 실증을 통해 피크 수요 감소를 증명하였다[2-4]. CVR 실증은 전압제어, LD C(line drop compensation), VVC (voltage-VAR control)등의 방식을 이용하여 수행되었다.

과거에는 CVR을 피드백이 없는 개방 루프 제어(open-loop control) 기법으로 실증하였다. OLTC는 변전소

의 2차측 전압을 제어를 통해 이하 선로 전체의 전압을 제어하므로 OLTC를 통한 LDC방식이 전압저감에 많이 사용되었다 [5]. LDC방식이 쉬운 제어방식이지만, 배전계통의 동적 부하 특성을 고려하는 LDC 설정값을 구하는 것은 어렵다. 게다가, 대부분의 전력회사들은 최소한의 요구 전압을 보장하기 위한 전압 여유를 가지고 있어 CVR의 효과가 감소한다. 즉, OLTC/LDC 기반의 CVR은 추가적인 비용이 없는 쉬운 방식이지만, LDC 설정 값을 선정하는 것이 어렵고 전압저감의 효과가 제한적이다. CVR을 목적으로 스위치 캐패시터가 사용되는데 이는 계통의 전압을 평탄화하고 전력 손실을 감소시킨다. 특히, 전압강하가 큰 경우, 캐패시터는 CVR 효과를 증가시킨다 [6].

최근, SCADA 기반 또는 AMI 기반의 VVC가 개발되

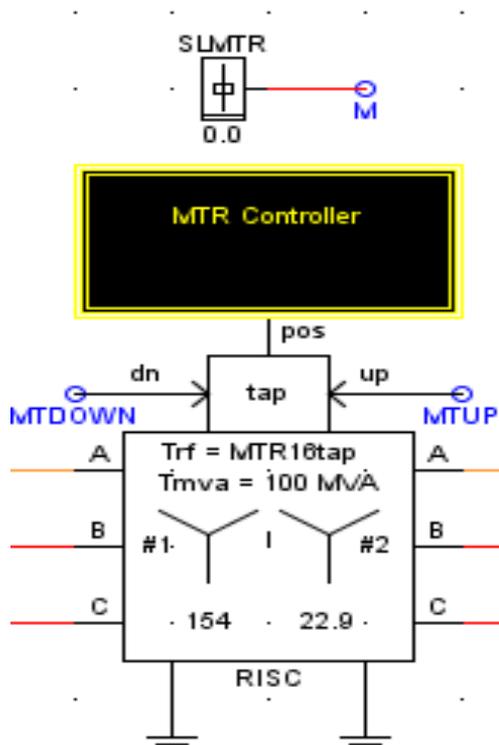


Fig. 1. OLTC 제어기 및 변압기 모델.

면서 CVR이 중요한 운영 방식이 되었다. 이러한 경우, CVR은 다양한 계측기를 사용하여 폐루프 제어(closed loop control)방식으로 제어하고 최적 VVC제어 지령치를 결정한다 [7]. 여러 전력회사들은 배전계통에 CVR 모드 제어 운영을 하고 있다. Inland Power and Clatskanie PUD는 SCADA 기반의 VVC를 운영하고 있다 [8]. Dominion Virginia Power [9], SCE[10], Duke Energy [11]와 같은 전력 회사들은 AMI 기반의 CVR 모드 제어를 수행했다. 기존의 OLTC/LDC 기반의 제어방식에 비해 폐루프 제어 방식은 최적 전압 저감, 극대화된 에너지 저감 효과가 있으며 계통의 동적 변동에도 반응할 수 있다.

CVR 제어에서는 계통의 최저 전압이 하한 유지범위 이상을 유지해야 하므로 정확한 전압 계측 및 예측이 되어야 한다. 하지만 계통의 전압을 계산하는 것은 어렵고 오차가 크게 발생하는 경향이 있다. 최근 계측 기술의 발달로 계통에 AMI를 비롯한 전압계측 장치의 설치가 증가하고 있다 [12]. 따라서 조류계산을 통한 전압 예측 대신 정확한 계측값에 기반한 CVR 제어 알고리즘의 적용이 필요하며 현재 기술적으로도 타당성이 있다. 정확한 CVR 제어 알고리즘 개발 및 성능검증을 위해서는 실증 테스트가 필요하지만 실증 테스트는 많은 제약이 따르며 비용도 많이 소요된다. 따라서 현장 적용 전에 RTDS (Real Time Digital Simulator)로 알고리즘을 검증 및 보완하면 즉각적인 현장 적용보다는 더 경제적이고 효과적이다. 따라서 본 논문에서는 RTDS로 CVR 제어 알고리즘을 검증할 수 있는 시스템을 구축했다. RTDS를 이용하여 배전 계통 및 CVR을 위한 전압제어 기기들을 상세 모델링하고 MATLAB으로 RTDS의 모의 계통의 전압을 계측하고 제어할 수 있는 제어기를 구성

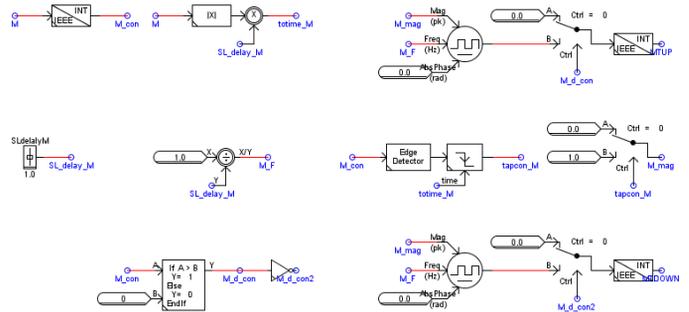


Fig. 2. OLTC 제어기 pulse 생성 로직.

하였다. 추가적으로 간단한 계통 구성에 대해 알고리즘을 제안하고 제어 알고리즘을 MATLAB을 통해 구현하였고 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 검증하였다.

II. 배전계통 및 전압제어기기의 RTDS 모델 개발

계측 기반 CVR 알고리즘 검증 및 시뮬레이션을 위해서 배전계통 설비 모델을 개발하였다. 배전계통의 전압변동을 해석하기 위한 전압제어설비로 OLTC (On Load Tap Changer), SVR (Step Voltage Regulator), 전압에 따른 부하 특성, 분산전원(DG, Distributed Generation), Capacitor의 수학적 모델을 개발하였다. RTDS 기본 모델 중 사용가능한 모델은 그대로 활용하고 MATLAB을 통한 실시간 제어 신호가 시뮬레이션에 반영될 수 있도록 추가적으로 수정하였다. 기본 모델이 없거나 실제 제약조건이 고려되지 않을 경우 새로운 수학적 모델 개발하거나 기존 모델은 수정하였다. 모든 제어기기는 외부 지령치에 의해 제어되도록 추가 수정하였다.

A. OLTC 모델링

RTDS의 변압기 모델은 push button 컨트롤러를 이용하여 2차측 전압을 변동할 수 있도록 모델링 되어 있다. 추후 알고리즘의 지령치는 변압기의 특정 탭 수를 올리고 내리는 결과가 출력되는데 이 결과가 변압기 모델에 적용될 수 있도록 변압기 제어기를 모델링 하였다. RTDS의 변압기 모델은 탭 변동이 즉각적으로 반응하도록 모델링 되어 있는데 실제 OLTC의 경우는 제어 시간 지연이나 변압기의 동작의 시간지연이 존재할 수 있으므로 변압기 탭 동작 시간지연 특성을 반영할 수 있도록 하였다. 개발된 OLTC 제어기는 ±탭 지령치와 시간지연 값을 입력으로 하여 전압 변동 신호가 출력되도록 구성하였고, 변압기 모델의 Tap 입력으로 연결하도록 구현하였다.

Fig. 1은 탭 지령치를 Slider로 입력받아 변압기의 제어기를 거쳐 변압기로 pulse를 입력한다. Fig. 2는 탭 지령치를 pulse로 출력하는 OLTC 제어기 로직으로 탭 제어 시간지연은 제어기 특성으로 볼 수 있으므로 제어기 내부에서 설정할 수 있도록 구성하였다. Pulse generator는 시간지연 주기로 펄스를 발생하게 한다. 입력이 들어오면 입력된 횟수만큼 펄스가 발생하는 동안 변압기에 입력이 되고 횟수가 다 되면 입력이 끊어진다. 입력이 음

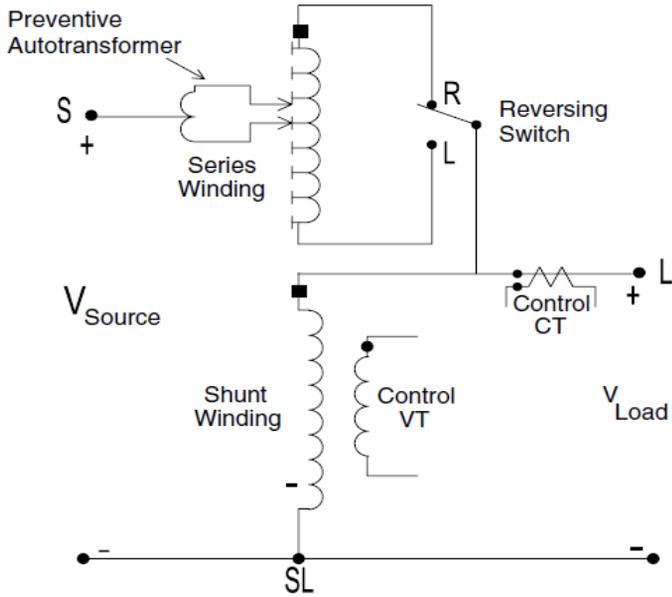


Fig. 3. SVR 구성.

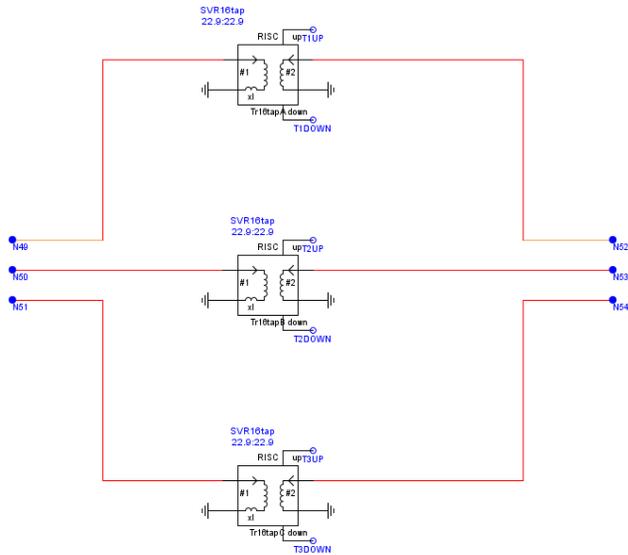


Fig. 4. 단상 변압기 3상 결선.

수이면 탭을 내리는 입력으로 연결되고 양수이면 탭을 올리는 입력으로 연결한다.

B. SVR 모델링

SVR은 배전시스템의 전압강하가 큰 선로에 설치되어 국소적인 전압 문제를 해결하는 전압제어 설비로 분산 전원이 연계된 장거리 선로 등에 적용하여 국소적 전압 문제를 해결하기 위한 전압제어 설비이다. SVR은 Fig. 3과 같은 Tap changing mechanism을 갖는 단권변압기 (Autotransformer)로 동작 특성은 변압기가 Autotransformer라는 점을 제외하고는 OLTC 변압기와 동일하다.

일반적인 SVR은 탭 제어가 가능한 단권변압기로 ±10%의 전압 제어가 가능해야 한다. RTDS에서 지원하는 단상 단권변압기는 탭 제어가 가능하지만 Fig. 3과 같이 단권 변압기를 결선하고 구성하면 SVR과 동일한 효과가 나타낼 수 없다. 이에 단권변압기로 구현이 어려우므

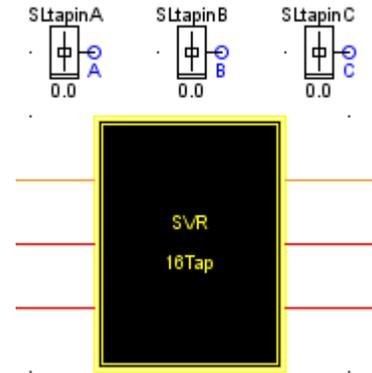


Fig. 5. SVR 모델.

로 탭 제어가 가능한 변압기를 이용하여 SVR과 동일한 기능이 구현되도록 모델링하고 상별 제어가 가능하도록 Fig. 4와 같이 단상 변압기 3개를 결선하여 모델링했다.

Fig. 5와 같이 OLTC와 동일하게 SVR 제어기는 ±탭 지령치와 시간지연 값을 입력으로 하여 전압 변동 신호가 출력되도록 구성하였고, RSCAD의 변압기 Tap 입력으로 연결되도록 구현하였다.

C. 부하의 전압의존 특성 모델링

CVR의 경우, 부하 모델에 대하여 매우 의존적이므로 정확한 CVR 평가를 수행하기 위해서는 계통의 부하 특성을 충실히 반영하는 부하 모델링이 필요하다. 정적인 부하모델은 정전력, 정전류, 정임피던스의 조합으로 구성된 ZIP모델로 Eq. 1과 같으며 ZIP모델은 정전력, 정전류, 정임피던스의 비율에 따라 부하 모델이 결정되며 각 구성비율에 따라 해석 결과도 달라진다.

$$P_{set} = P_0 \times \left(Z_P \times \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_P \times \frac{V}{V_0} + P_P \right)$$

$$Q_{set} = Q_0 \times \left(Z_Q \times \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + I_Q \times \frac{V}{V_0} + P_Q \right)$$

(1)

Q_0, P_0 는 기준 유, 무효전력, P_{set}, Q_{set} 은 출력 유, 무효 전력, Z_P, Z_Q 은 정임피던스 계수, I_P, I_Q 는 정전류 계수, P_P, P_Q 정전력 계수, V 는 연계점의 전압, V_0 은 기준 전압이다. RTDS의 부하 모델은 단순한 정전력 부하 모델링할 수 있으며, ZIP 모델 특성을 반영하는 모델을 지원하지만 즉각적인 전압변동이 적용이 되지 않아 전압변동이 적용될 수 있도록 수정하였다. Fig. 6은 외부 입력 기능을 사용하면 ZIP 부하 특성을 적용한 후 부하 모델에 입력하도록 구현하였다.

D. DG 모델

다양한 분산전원 및 SVR 제어 시나리오에 의한 전압 조정 효과를 비교 분석하는 것이 주목적이므로, 분산 전원을 레퍼런스에 따라 일정 유, 무효 전력을 공급하는 이상 전압원 또는 전류원으로 모델링하여도 무방하다. 따라서, 분산전원의 RTDS 모델은 계통에 연계되는 제어

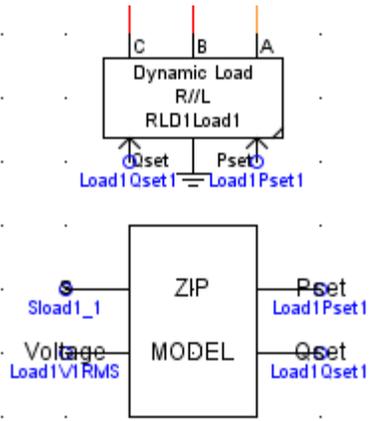


Fig. 6. ZIP 부하 모델.

가능한 전류원과 이 전류원의 레퍼런스를 계산하는 수학적 모델부분으로 구성하였다. 분산전원의 출력 유, 무효전력(P_{DG} , Q_{DG})과 연계점 전압(V_{DG}) 및 전류(I_{DG})의 관계는 Eq. 2와 같다.

$$P_{DG} + jQ_{DG} = |V_{DG}| \angle \theta_V \cdot |I_{DG}| \angle -\theta \quad (2)$$

따라서 Eq. 2로부터 전류원 레퍼런스의 크기 및 위상은 Eq. 3과 같이 계산된다.

$$|I_{DG}| = \frac{\sqrt{P_{DG}^2 + jQ_{DG}^2}}{|V_{DG}|}$$

$$\theta_I = \theta_V - \tan^{-1} \frac{Q_{DG}}{P_{DG}} \quad (3)$$

전류원의 레퍼런스를 계산하기 위한 수학적 모델은 RTDS상에서 Fig. 7과 같이 구현하였다. 분산전원의 유, 무효 전력 레퍼런스는 per unit 값을 입력으로 받고 이 값들로부터 역률각을 계산한다. 연계점의 전압 계측값으로부터 PLL 블록을 통해 전압의 위상각을 계산한다. 전압의 위상각과 역률각으로부터 a상 전류원의 위상각을 계산한다. b, c상의 위상각은 120도씩의 위상 변위를 고려하여 결정한다. 유, 무효 전력 레퍼런스로부터 피상전력의 레퍼런스를 계산하고, 이를 전압의 크기로 나누어 전류원의 크기를 계산한다. 계산된 전류원의 크기와 위상을 이용하여 3상 정현파(sine) 전류 레퍼런스 신호를 생성한다.

E. Capacitor Bank 모델

Capacitor는 배전계통에 무효전력을 공급함으로써 배전 계통의 역률을 개선함과 동시에 전압을 상승시킨다. Capacitor 용량을 나타내는 방법은 kvar와 uF 두가지를 사용하는데 이 두 단위를 환산하는 방법은 Eq. 4와 같다.

$$Q_C = 2\pi fCV^2 \times 10^{-9} \text{ [kvar]}$$

$$C = \frac{Q_C \times 10^9}{2\pi fV^2} \text{ [\mu F]}$$

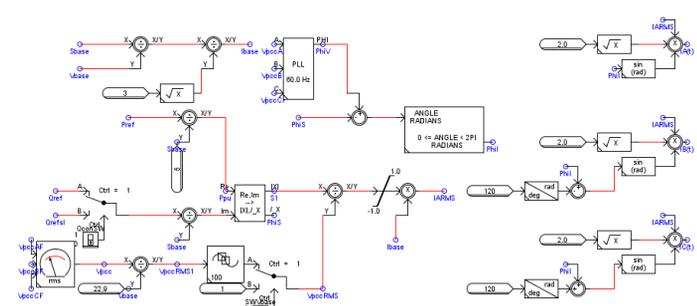


Fig. 7. 전류원 기반 DG 모델의 RSCAD 모델링.

(4)

C는 정전용량, Q_C 는 Capacitor 무효전력 용량, f는 주파수, V는 정격전압이다. RSCAD에 모델은 Capacitor 용량을 μF 단위로 입력할 수 있도록 되어 필요한 용량을 식 4로부터 계산한다. 4뱅크로 구성하여 각 스위치를 결선하고 추후 알고리즘이 개발되면 스위치를 제어할 수 있도록 구성하였다. 외부에서 Capacitor 투입 수 지령치가 입력되면 각 뱅크의 스위치가 On, Off가 결정된다. Fig. 8은 비교기를 활용하여 입력이 들어오면 입력한 수만큼의 Capacitor의 스위치가 on되도록 구성하였다.

III. MATLAB-RTDS 연동

Fig. 9는 RTDS와 MATLAB의 제어기 구성을 보여준다. RTDS에서 제공한 프로그램을 수정하였으며, MATLAB의 JTCP 함수와 RTDS의 script 기능을 이용하였다 [13]. MATLAB의 JTCP의 함수는 MATLAB에서 텍스트를 IP address와 포트 번호로 보낼 수 있는 함수이다. RTDS의 script 기능은 사용자가 미리 지정한 일을 순서대로 수행하는 기능으로 사용자가 수행할 일을 미리 녹화하거나 명령어 형태인 텍스트로 입력할 수 있다. 그러므로 RTDS에서는 script 기능에서 텍스트를 입력받을 수 있는 대기 상태로 두고, MATLAB에서 script 명령어를 JTCP 함수를 통해 메시지 형태로 보내게 되며 메시지가 전달되면 script 기능에 명령어가 입력되어 수신된 명령이 수행된다. 즉, script와 JTCP를 IP address와 포트 번호를 일치시키고 MATLAB에서 제어 명령 또는 계측 명령을 보내면 script에서 인식하게 된다. 이와 같은 제어기는 MATLAB의 계산 기능 및 데이터 처리 기능을 활용할 수 있으며 MATLAB에서 지원하는 다른 최적화 기능 또는 다른 여러 기능들까지 활용할 수 있다. 또한 제어 알고리즘을 MATLAB code로 구현할 수 있는 장점을 지닌다.

Fig. 10은 RTDS에서 script 기능에서 텍스트를 입력받을 수 있는 대기 상태의 script 입력 내용이다.

Fig. 11은 MATLAB의 m파일로 통신을 위한 기본적으로 입력해야 할 내용이다. 여기서, portnum은 통신 IP address의 Port 번호이고 RTDS의 Port 번호와 일치시켜야 한다. RTDS의 script를 실행하고 그림과 같이 입력이 되면 MATLAB과 RTDS와 통신이 활성화 된다.

Fig. 12는 계측 값을 받아 올 때 예시를 보여준다. RTDS의 'VALOUT' 변수의 값을 MATLAB의 변수인

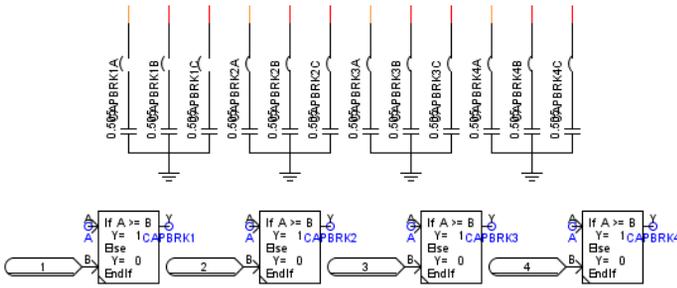


Fig. 8. 4 Bank Capacitor 모델.

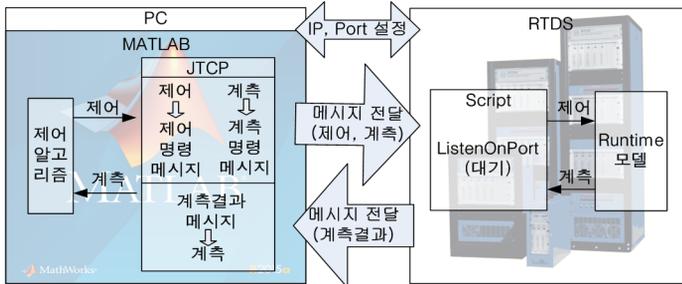


Fig. 9. RTDS-MATLAB 연동 시스템 구성도.

'fTemp2'로 가져오는 예시 code이다.

MATLAB에서 'n' 변수인 데이터를 RTDS의 'VAL'인 변수 slider에 입력으로 보낼 때 Fig. 13과 같이 입력한다. Fig. 12와 같이 RTDS의 계측 데이터를 입력받아 MATLAB으로 연산을 통해 제어 지령치를 Fig. 13과 같이 입력된다.

RTDS 모의 계통은 실제 계통 역할을 하고 MATLAB은 실제 계통을 제어하는 상위 제어기 역할을 할 수 있다. RTDS로 실제 계통을 모의하고 MATLAB으로 제어기기를 구성하면 실제 계통을 제어하는 제어기기를 구성하는 것과 같은 효과를 볼 수 있다. 본 논문에서는 RTDS는 계통을 모의하고 제어할 수 있는 제어 대상 계통이 되고 MATLAB은 이 제어 대상 계통을 제어하는 제어기가 된다.

IV. 제어 알고리즘

CVR은 계통의 전압을 낮추어 부하의 수요를 줄여 에너지를 절감하는 기술로 계통의 전압을 계통 운영 전압 범위에서 가장 낮게 유지해야 한다. 계통의 전체 전압을 가장 낮게 유지하기 위해서는 전압 제어기기를 이용하여 전압 프로필을 되도록 평탄하게 유지하고 전체 전압을 낮게 유지하는 방법이 있다 [14]. 계측 전압이 주어지므로 Fig. 14와 같은 룰기반의 알고리즘을 제어기기 구성에 따라 제안하였다. 복잡한 최적화 방식이 아닌 룰기반의 쉬운 알고리즘을 제안하였다.

A. 변압기와 Capacitor 조합

Fig. 15과 같이 전압제어기기들의 구성도를 나타내며 Capacitor와 같은 무효전력 제어기기는 설치 위치와 설치 용량에 따라 전압 프로필에 미치는 영향이 다르다. OLTC와 같은 전압 제어기기는 설치 지점에 상단에는

```
float temp_float, temp_float1;
string temp_string, temp_string1;

fprintf(stdmsg, "Initialization of RTDS simulation");

ListenOnPort(2844, true);

fprintf(stdmsg, "Execution of script is done\n\n");
```

Fig. 10. script 입력 내용.

```
portnum = 2844;

% Runtime is acting as TCP socket server
JTCPobj = jtcp('REQUEST', '192.168.0.103', portnum);
```

Fig. 11. MATLAB 입력 내용.

```
% Capture meter value
jtcp('writes', JTCPobj, 'temp_float = MeterCapture('VALOUT');');
jtcp('writes', JTCPobj, 'sprintf(temp_string, "VALOUT = %f END", temp_float);');
jtcp('writes', JTCPobj, 'ListenOnPortHandshake(temp_string);');

rmsg = [];
rmsg2 = 'dummy';

while (isempty(regexp(rmsg2, expr2)) == 1)

    rmsg = [rmsg jtcp('read', JTCPobj)];
    rmsg2 = char(rmsg);

    if (regexp(rmsg2, expr2))

        [tokens value] = regexp(rmsg2, expr2, 'tokens', 'names');

        fTemp2 = str2num(value, var_value1);

        msg2 = sprintf('VALOUT returned: %f', fTemp2);
        disp(msg2);

        break;
    else
        continue;
    end
end
```

Fig. 12. MATLAB 입력 내용.

```
{fcb(.411498, '11Cb08T' #285):
#285 = 2b1u1(.26f21196L_20p22246# #1 : C1F2 : jubnf2 : AWL. = X11.' u):
```

Fig. 13. MATLAB 입력 내용.

영향이 거의 없고 하단의 전압 전체에 영향을 준다. 이러한 특성을 반영하여 룰 기반 CVR 제어 알고리즘을 구현하였다.

무효전력 제어기는 계통의 전압 프로필을 평탄화하도록 제어하고 전압제어기기는 계통의 전압을 운영 범위 내에서 가장 낮게 유지하도록 제어하였다. Capacitor는 계통의 전압 프로필을 평탄화하기 때문에 연계점의 전압을 변압기 2차측 전압과 같아지도록 제어한다. Capacitor 제어 지령치는 다음과 같이 연산한다.

$$k = kC_{cap}^0 + floor\left(\frac{V_{Tr} - V_{Cap}}{X_{Cap} \cdot Q_{cap}}\right), \quad k = 0,1,2,3,4 \quad (5)$$

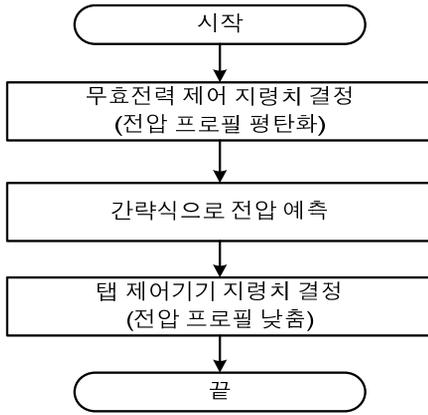


Fig. 14. 제어 알고리즘

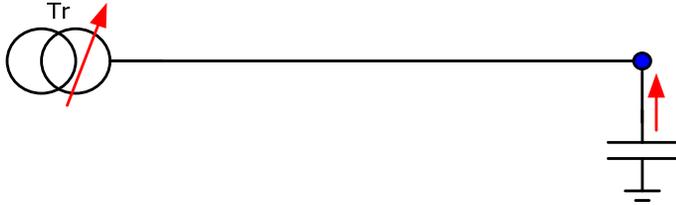


Fig. 15. 변압기와 Capacitor 구성.

여기서, V_{Tr} 은 변압기 2차측의 전압, V_{Cap} 는 Capacitor 연계점 전압, X_{Cap} 는 Capacitor 연계점까지 선로 리액턴스, Q_{Cap} 는뱅크당 용량, k_{Cap}^0 는 초기 Capacitor 상태를 나타낸다. 4뱅크 캐패시터이므로 Cap_{Ref} 가 4이상이면 4로 설정한다.

OLTC 탭 지령치를 구하기 위해 계통의 전압 상황을 다음 식으로부터 예측이 가능하다.

$$\Delta V_n = \begin{cases} Q_{Cap} \times k \times \sum_{i=1}^n X_i & n < n_{cap} \\ Q_{Cap} \times k \times X_{Cap} & n \geq n_{cap} \end{cases} \quad (6)$$

$$V_n = V_n^0 + \Delta V_n \quad (7)$$

OLTC 탭 지령치를 구하는 것은 다음과 같이 연산한다.

$$Margin_{min} = floor\left(\frac{\min(V_n) - V_{min}^{limit}}{\Delta V_{step}}\right) \quad (8)$$

$$Margin_{max} = floor\left(\frac{V_{min}^{limit} - \max(V_n)}{\Delta V_{step}}\right) \quad (9)$$

여기서, V_{tap} 은 한 탭당 전압 변동폭, V_{min}^{limit} , V_{max}^{limit} 는 계통의 운영 전압 범위를 나타낸다. 계측 최고 전압과 계통 운영 범위 최고 전압 기준으로 올릴 수 있는 탭 여유($Margin_{max}$)를 구하고 최저전압과 계통 운영 범위 최저 전압 기준으로 내릴 수 있는 탭 여유($Margin_{min}$)를 구한다. 내리고 올릴 수 있는 여유를 바탕으로 세 가지 전

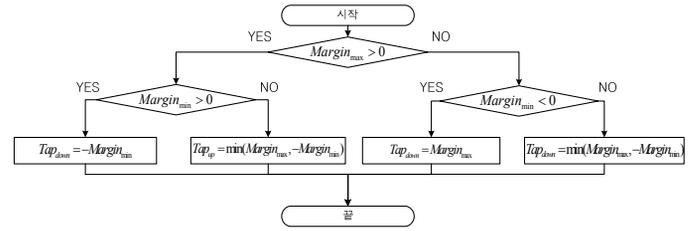


Fig. 16. 탭 제어 지령치 연산.

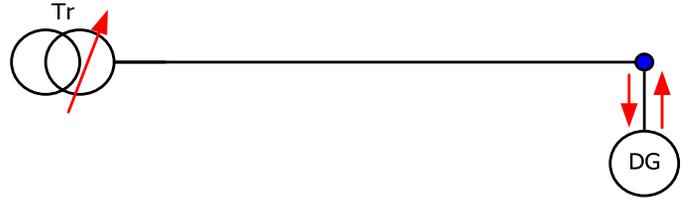


Fig. 17. 변압기와 분산전원 구성.

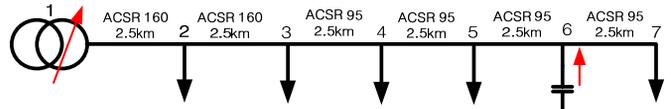


Fig. 18. Capacitor 연계 모의 계통.

압 상태를 구분하여 Fig. 16과 같이 지령치를 연산한다. 과전압($Margin_{max} < 0$)은 최고 전압이 운영범위를 벗어난 상태이므로 우선순위로 해소해야 한다. 저전압($Margin_{min}$)은 최저 전압이 운영범위를 벗어난 상태로 우선순위인 과전압이 발생하지 않는 범위내에서 저전압을 해소해야 한다. 위배없음($Margin_{max}, Margin_{min} > 0$)은 계통의 전압 위배가 없는 상태로 계통의 최저 전압을 최대한 내리는 지령치를 결정한다. Eq. 6과 Eq. 7에서 구한 Capacitor에 의한 변동된 최고, 최저 전압을 이용하며 변압기 탭 제어 지령치를 결정한다. Fig. 16는 탭 제어 지령치를 구하는 플로우 차트이다.

여기서, Tap_{down} , Tap_{up} 은 변압기 탭 최종 지령치로 각각 탭을 올리는 지령치, 탭을 내리는 지령치이다.

B. 변압기와 분산전원 조합

Fig. 17과 같은 구성에서 분산전원의 무효전력은 Capacitor와 동일하게 계통의 전압을 평탄화를 목적으로 제어된다.

분산전원의 무효전력 지령치를 연산하는 것은 계통의 전압프로필을 평탄화하기 위해 변압기의 2차측 전압과 같도록하는 무효전력을 구한다.

$$\Delta Q_{ref} = (V_{Tr} - V_{DG})/X_{DG} \quad (10)$$

여기서, V_{DG} 는 분산전원 연계점 전압, X_{DG} 는 분산전원 연계점까지 리액턴스이다. 구해진 무효전력 지령치를 이용하여 계통의 전압을 다음 식과 같이 예측할 수 있다. 구해진 전압변동에 따른 변압기 탭 제어 지령치는 Capacitor 조합과 동일하게 Fig. 16와 같이 연산한다.

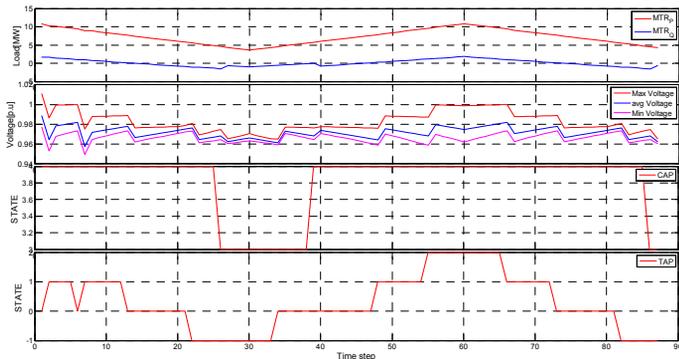


Fig. 19. 변압기 Capacitor 조합 시뮬레이션 결과.

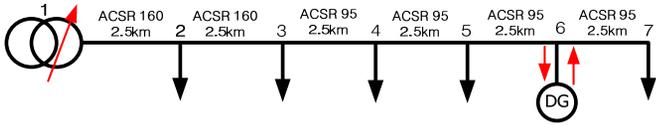


Fig. 20. 분산전원 연계 모의 계통

$$\Delta V_n = \begin{cases} \Delta Q_{DG} \times \sum_{i=1}^n X_i & n < n_{DG} \\ \Delta Q_{DG} \times X_{DG} & n \geq n_{DG} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_n = V_n^0 + \Delta V_n \quad (12)$$

V. 시뮬레이션

실시간 계측 및 제어를 위해 실시간 전력계통 모의 장비인 RTDS를 이용하여 RTDS-MATLAB 연동 시스템을 개발하고 모의 계통을 시뮬레이션 하였다. 모의계통을 RTDS를 이용해 구성에 따른 계통을 모델링하고 시뮬레이션하였다. 계통의 전압을 변동하는 요인들이 많지만 시뮬레이션에서는 부하만을 변동하고, 부하 모델은 전압에 의존하는 모델로 구성하였다. 통상적인 유효 전력 CVR factor가 0.6~1.0인점을 고려하여 본 논문에서는 유, 무효 ZIP파라미터는 0.4, 0.3, 0.3으로 가정하였다. 각 부하는 0.8 MVA ~ 2.4 MVA 일괄적으로 제어하도록 모의하였다. 총 시뮬레이션 시간은 450초, 계측과 제어 주기는 5초로 설정하였다.

A. 변압기 Capacitor 조합 모의 결과

Fig. 18은 Capacitor가 설치된 모의 계통으로 설치된 Capacitor는 banks당 1 MVar인 4banks Capacitor로 총 용량은 4 MVar이다. 계통 운영 최저 전압은 0.96 (p.u)로 설정하였다.

Fig. 19은 알고리즘 시뮬레이션 결과이다. 4개의 그래프로 구성되었으며 첫 번째는 변압기 2차측에서 출력하는 유, 무효전력, 두 번째 그래프는 각 노드의 전압 중 최고, 최저, 평균전압, 세 번째 그래프는 Capacitor의 투입/개방 상태를 나타낸다. 마지막은 변압기의 탭 제어 상태를 나타낸다. 전체적으로 최저 전압을 허용 최저 전압

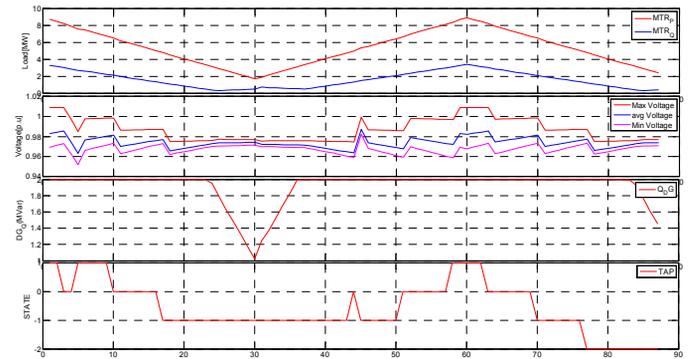


Fig. 21. 변압기 분산전원 조합 시뮬레이션 결과.

에 가깝게 Capacitor와 변압기의 탭 제어가 이루어지는 것을 볼 수 있다. 계통의 부하가 큰 구간에서는 Capacitor가 최대 출력을 하는 것을 볼 수 있으며 Capacitor가 계통의 전압 프로필을 평탄화하기 위해 투입되었기 때문이다. 변압기의 탭 변동은 계통의 유, 무효전력의 변동에 따라 변동하는 것을 알 수 있다.

B. 변압기 분산전원 조합 모의 결과

Fig. 20은 분산전원이 연계된 모의 계통으로 계통의 설치된 분산전원은 유효전력 출력치는 2 MW가 출력하는 것으로 가정하였으며, 무효전력 제어 범위는 -2.0 ~ 2.0 MVar로 설정하였다.

Fig. 21은 시뮬레이션 결과를 보여주며 분산전원 연계점 전압이 변압기 2차측 전압과 같도록 무효전력에 출력하기 때문에 거의 모든 시간에서 최대 출력한다. 최대 출력이 아닌 구간에서는 무효전력 제어를 통해 전압을 일정하게 유지하는 것을 볼 수 있다. 변압기 탭 변동은 부하의 변동에 따라 변동하는 것을 볼 수 있고, 최저 전압을 운영 최저 전압에 가깝게 제어한다.

VI. 결론

본 논문에서는 CVR 제어 알고리즘 개발 및 검증을 위한 RTDS-MATLAB연동 시뮬레이션 환경을 제안하였다. RTDS를 이용하여 배전 계통 및 CVR을 위한 전압제어기기들의 상세 모델링을 하고 MATLAB으로 RTDS의 모의 계통의 전압을 계측하고 제어하는 시스템을 구성하였다. CVR을 위한 간단한 알고리즘을 구현하고 제안하는 시스템에 적용하여 시뮬레이션 검증을 하였다. 제안하는 시스템으로 다양한 실시간 CVR 알고리즘을 현장 적용하기 전에 많은 시험을 할 수 있을 것으로 판단되며 현장적용 전에 알고리즘을 검증함으로써 실증에 대한 효과 및 다른 요인들을 사전에 검증할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Korea Electric Power Corporation through KEPCO Research Institute. (Grant number : R15DA15)

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 2015년 선정된 자체연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15DA15)

REFERENCES

- [1] J. C. Erickson and S. R. Giligan, "The effects of voltage reduction on distribution circuit loads," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101 1982.
- [2] D. Kirschner, P. Ciorsetto, "Statistical Tests of Energy Savings Due to Voltage Reduction", IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-103, pp.1205-1210, June 1984.
- [3] D. Kirshner, "Implementation of conservation voltage reduction at Commonwealth Edison", IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, pp.1178-1182. 1990.
- [4] B. R. Scalley, "The effects of distribution voltage reduction on power and energy consumption", IEEE Transactions on education, vol. 24, pp.210 - 216, 1981.
- [5] Z. Wang, J. Wang, "Review on Implementation and Assessment of Conservation Voltage Reduction", IEEE Trans. Power Syst., vol. 29, pp.1306-1315. 2014.
- [6] L. Du, L. He, and R. G. Harley, "A survey of methods for placing shunt capacitor banks in power network with harmonic distortion," in Proc.IECON 2012—38th Annual Conf. IEEE Industrial Electronics Society, 2012, pp. 1198–1203.
- [7] R. Uluski, "VVC in the smart grid era," in Proc. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010, pp. 1–7.
- [8] T. Wilson and D. Bell, "Energy conservation and demand control using distribution automation technologies", in Proc. Rural Electric Power Conf., p.C4-1-12, 2004.
- [9] M. A. Peskin, P. W. Powell and E. J. Hall, "Conservation voltage reduction with feedback from advanced metering infrastructure", in Proc. 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conf. Expo. (T&D), 2012, pp. 1-8.
- [10] R. Neal, "The use of AMI meters and solar PV inverters in an advanced Volt/VAr control system on a distribution circuit", in Proc. 2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conf. Expo., 2010, pp. 1-4.
- [11] R. Belvin and T. Short, "Voltage reduction results on a 24-kV circuit," in Proc. 2012 IEEE PES Transmission and Distribution Conf.Expo.(T&D), 2012, pp. 1–4.
- [12] R. C. Dugan and M. McGranaghan, "Sim city," IEEE Power and Energy Mag., vol. 9, pp. 74–81, 2011.
- [13] RTDS Technologies, RTDS User Manual Set, RTDS Technologies, 2006.
- [14] S. Go, S. Ahn, J. Choi, W.Jung, C. Chu, "Development and Test of Conservation Voltage Reduction Application for Korean Smart Distribution Management System", IEEE PES, 2015