

VAR 시스템에 의한 3 상 불평형 부하의 무효전력 보상에 관한 연구

정 언택\* 서 영수\* 김 영봉\*\* 김 한수\*\* 이 봉주\*\*  
\*명지대 공대 전기공학과 교수, 공박 \*\*명지대 대학원 전기공학과

A STUDY ON THE REACTIVE POWER COMPENSATION OF THREE PHASE UNBALANCED LOAD FOR VAR SYSTEM

Yon-Taek Jung\*, Young-Soo Seo\*, Young-Bong Kim\*\*, Han-soo Kim\*\*, Bong-Joo Lee\*\*  
Dept. of Electrical Eng. Myong-Ji University

ABSTRACT

In this paper, the way that input voltage and input line current as a control variable is provided as one unit is projected. Till now, have dealt with three phase balanced load. But, in that case, total power factor compensation is difficult, for to control each phase at unbalanced load. Therefore, in this paper suggest of the scheme that three phase unbalanced load is controlled by each phase and input total power factor is compensated unit input factor. therefore, in this paper suggest that three phase unbalanced load is controlled and the method in compensation of unit input factor to be attended by unbalanced load. Besides, the object of control is calculating quantity for input voltage and input line current for the point at issue make to improve of control method at unbalanced load. As a result, control system of each phase could maintain as a unit input total power factor has been state diviation error of 2% with unbalanced load.

1. 서 론

본 논문은 입력전압과 입력선전류를 제어변수로 하여 입력 총합역률을 단위로 유지하는 방법을 연구했다. 지금까지는 평형부하를 다루워왔다. 그러나 불평형부하로 운전할 경우 상별제어에 문제가 대두되어 총합 역률보상에 어려움이 있게 된다. 따라서 본 논문은 3상 불평형 부하를 각 상별로 제어하여 불평형에 따른 입력역률이 단위 입력 총합역률로 보상되는 방법을 제시하였다. 또한, 불평형 부하에서 제어방법상의 문제점을 개선하기 위하여 입력선전류와 입력총합역률에 대하여 연산한 서셉턴스를 제어 대상으로 하였다. 그결과 부하의 불평형에 따른 3 상의 제어 시스템이 정정상태편차 ±2% 오차를 갖는 단위 입력 총합역률로 유지할 수 있었다.

2. 본 론

1. 제어 및 시스템 이론 해석

그림 2-1은 부하, 고정 캐패시터 및 TCR의 해석에 관한 회로도이다. 불평형 유도성 부하로 입력전압이 입력되면 고정 캐패시터 (FC)단에서는 유도성 부하에 대하여 과보상을 할 수 있는 크기로 캐패시터가 투입된다. TCR단에서 요구되는 보상 리액턴스는 FC와 부하의 각 서셉턴스의 합에 대한 TCR의 서셉턴스 값과 같을 때

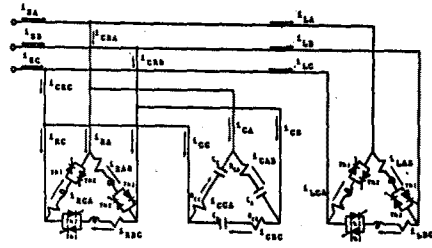


그림 2-1 시스템의 결선 Fig. 2-1 Connection of system

완전 보상이 될 수 있다. 본 논문에서 다른 무효전력 보상 방법은 3상 불평형 부하에 대하여 고정 캐패시터-다이리스터 제어용 가변 인덕터형(Thyristor controlled Reactor-Fixed Capacitor ; TCR-FC) 무효전력 보상을 이용하였다. 이 방법은 TCR방식에 고정 전력용 콘덴서를 병렬 접속한 방법으로서 지상, 진상 무효전력 발생이 가능하고 조정이 연속적이기 때문에 본 방식을 채택했다. 각 구분에 대한 어드미턴스를 1 상분에 대하여 표시하면 다음식과 같다.

$$\begin{aligned} Y_L &= G_L - jB_L \\ Y_C &= G_C + jB_C \\ Y_R &= G_R - jB_R \end{aligned} \quad \text{-----2-1}$$

여기서  $Y_L$ 은 부하,  $Y_C$ 는 캐패시터,  $Y_R$ 는 TCR의 어드미턴스이다.

식 2-1에서 부하와 고정 캐패시턴스의 서셉턴스의 합이 TCR-FC 방식에서는 양의 값으로 된다. 부하와 고정 캐패시터의 서셉턴스의 합을 B 이라하면

$$B_{CL} = B_C - B_L \quad \text{-----2-2}$$

식 2-2의 B 의 값이 TCR 서셉턴스 B 과 같을 경우 무효전력이 "0" 이 된다. 따라서 B 를 B 로 대치하여 TCR에 요구되는 가변리액터 값을 식 2-3 으로부터 식2-4로 표현할 수 있다.

$$B_{CL} = \frac{wL_R}{R_K^2 + wL_R^2} \quad \text{-----2-3}$$

$$L_R = \frac{1 - \sqrt{1 - 4R_K^2 B_{CL}^2}}{2wB_{CL}} \quad \text{-----2-4}$$

여기서  $w = 2\pi f, \frac{C_L}{R} = \text{TCR 직렬저항}$

그림 2-2는 VAR 시스템의 각 그룹을 1 상분에 대하여 표현한 것이다. 여기서 부하와 고정 캐패시터에서 발생하는 서셉턴스 즉  $B_C$  은 식 2-3에 의하여 TCR의 이상 다이리스터의 ON-OFF 작용에 의하여 리액터 L 에 다이리스터 점토 펄스열을 가하여 리액티브 임피던스로

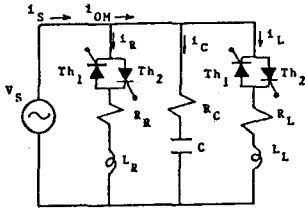


그림 2-2 1 상본에 대한 등가 회로  
Fig. 2-2 Equabnce curcuit of 1 phase

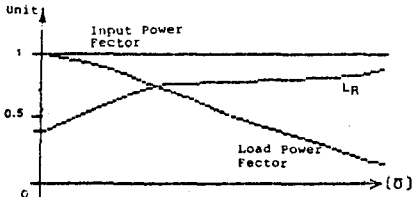


그림 2-3 서셉턴스의 변화에 따른 역률 및 TCR 리액티브 임피던스  
Fig. 2-3 Power factor and TCR reactive impedance with vary of suseptance

가변하게 된다. 그림 2-3은 부하의 서셉턴스  $B_L$ 에 대한, TCR 리액티브의 변화이며, 리액티브 임피던스의 변화에 대한 입력 총합역률이 보상 되는 과정을 나타내고 있다. 여기서 TCR 다이리스터 점호 펄스열에 가해지게 되는 점호각은 서셉턴스 연산기에서 구해진 각상의 불평형 서셉턴스 값에 대하여 식 2-3 및 2-4의 근거에 의하여 TCR 리액터  $L_n$ 의 값으로 변환된다.

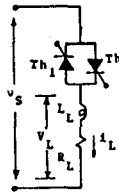


그림 2-4에서 다이리스터로 제어되는 부하에 전압이 가해졌을때, 이물 프리에 급수로 표현하면 다음 식으로 나타낼수 있다.

$$v_L = \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad \text{--- 2-5}$$

그림 2-4 부하  
Fig. 2-4 Load  
상본에 대하여 표시한 전류의 식은 식 2-6과 같다.

$$i_L = v_L (G_L + jB_L) \quad \text{--- 2-6}$$

$$i_C = v_L (G_C + jB_C)$$

$$i_R = v_L (G_R + jB_R)$$

또한, 식 2-6의 전류에 대한 절댓값은 식 2-7과 같다.

$$i_L = v_L \sqrt{G_L^2 + B_L^2} \angle \theta_L \quad \text{--- 2-7}$$

$$i_C = v_L \sqrt{G_C^2 + B_C^2} \angle \theta_C$$

$$i_R = v_L \sqrt{G_R^2 + B_R^2} \angle \theta_R$$

부하 전류와 고정 캐패시터 전류의 합을  $i_{om}$ 이라하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{om} = i_L + i_C = v_L \sqrt{G_{CL}^2 + B_{CL}^2} \angle \theta_{CL} \quad \text{--- 2-8}$$

$$\theta_L = \tan^{-1}(B_L/G_L)$$

$$\theta_C = \tan^{-1}(B_C/G_C)$$

$$\theta_{CL} = \theta_C - \theta_L$$

따라서, 입력전류는 다음 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$i_S = i_{om} + i_R I = v_L \sqrt{(G_{CL} + G_R)^2 + (B_{CL} - B_R)^2} \angle \theta_S \quad \text{--- 2-9}$$

$$\theta_S = \theta_{CL} - \theta_R$$

이때,  $i_S = v_L (G_{CL} + G_R) + j(B_{CL} - B_R)$  --- 2-10

$$P_S Q_S = \Delta i_S \frac{V_S}{G_0 + jB_0} \quad \text{--- 2-11}$$

$$\Delta i_S = \frac{(P_S C_0 - Q_S B_0) + j(P_S B_0 + Q_S G_0)}{I_S} \quad \text{--- 2-12}$$

이므로, 순시전력  $P_S$ 는 다음 식과 같다.

$$P_S = v_S i_S = v_S^2 [(G_{CL} + G_R) + j(B_{CL} - B_R)] \quad \text{--- 2-13}$$

따라서,

$$P = V_S^2 (G_L + G_R) \quad \text{--- 2-14}$$

$$Q_S = V_S^2 (B_{CL} - B_R) \quad \text{--- 2-15}$$

이다. 따라서 무효전력을 0으로 하기위해 식 2-19에서

$$0 = V_S^2 (B_{CL} - B_R) \quad \text{--- 2-16}$$

$$B_{CL} = B_R \quad \text{--- 2-17}$$

이다.

이때 식 2-17의  $B_{CL}$ 이 레귤레이터에서 보상 되어야 할 서셉턴스이다. 그림 2-5는 고정캐패시터(FC)와 부하전류의 합  $i_{om}$ 에 대한 진상역률  $\cos \theta$ 이 무효분을 갖는 입력역률각을 나타내며 이에대한 보상 서셉턴스  $B_{CR}$ 이 TCR 레귤레이터에 의해 보상되게 되는 과정을 보여준다.

따라서 이에 대한 보상 전류를 레귤레이터로 투입되는 등가전류로 나타내면 다음 식과 같다.

$$i_C = i_{om} \sin(\omega t - \theta_R) \quad \text{--- 2-18}$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{V_{LR}}{V_{RR}} \quad \text{--- 2-19}$$

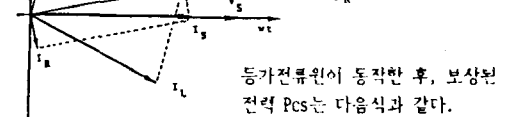


그림 2-5 보상 벡터도

$$P_{CS} = v_S i_{om} + v_R i_R \quad \text{--- 2-20}$$

## 2. 보상 서셉턴스에 대한 이론

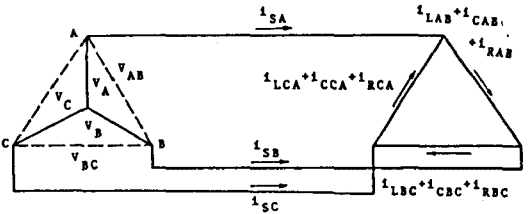


그림 2-8. 3상 부하 불평등 System의 계통도  
Fig. 2-8. Var System of phase unbalance load

그림 2-8은 3 상 시스템의 계통도로서 각 상전압과 선간전압은 식 2-21 및 2-22와 같다.

$$\begin{aligned} \text{상전압} \quad v_A &= V_m \sin(\omega t + \pi/2) \\ v_B &= V_m \sin(\omega t - \pi/3) \\ v_C &= V_m \sin(\omega t - 5\pi/6) \end{aligned} \quad \text{--- 2-21}$$

$$\begin{aligned} \text{선간전압 } V_{AB} &= \sqrt{3} V_m \sin \omega t \\ V_{BC} &= \sqrt{3} V_m \sin (\omega t - 2\pi/3) - 2-22 \\ V_{CA} &= \sqrt{3} V_m \sin (\omega t - 4\pi/3) \end{aligned}$$

따라서 선간전압과 선간 부하 전류를 식 2-23 및 2-24와 같이 놓을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{선간전압 } V_{AB} - V_A - V_B &= (1 - h^2) V \\ V_{BC} - V_B - V_C &= (h^2 - h) V \\ V_{CA} - V_C - V_A &= (h - 1) V \end{aligned} \quad \text{--- 2-23}$$

$$\begin{aligned} \text{선간부하전류 } I_{LA} &= I_{LAB} - I_{LCA} = Y_{AB} V_{AB} - Y_{CA} V_{CA} \\ I_{LB} &= I_{LBC} - I_{LAB} = Y_{BC} V_{BC} - Y_{AB} V_{AB} \quad \text{--- 2-24} \\ I_{LC} &= I_{LCA} - I_{LBC} = Y_{CA} V_{CA} - Y_{BC} V_{BC} \end{aligned}$$

또한 전류에 대한 일반식은 식 2-25와 같다.

$$I_0 = |I_0| (\cos \theta_0 + j \sin \theta_0) \quad \text{--- 2-25}$$

식 2-24의 선간 부하전류에 대한 식을 식 2-25 에 의하여 허수성분으로 표류하면 식 2-26과 같다.

$$\begin{aligned} I_m I_{LA} &= I_m I_{LAB} - I_m I_{LCA} = B_{AB} V_{ab} - B_{CA} V_{CA} \\ I_m I_{LB} &= I_m I_{LBC} - I_m I_{LAB} = B_{BC} V_{BC} - B_{AB} V_{AB} \quad \text{--- 2-26} \\ I_m I_{LC} &= I_m I_{LCA} - I_m I_{LBC} = B_{CA} V_{CA} - B_{BC} V_{BC} \end{aligned}$$

여기서 불평등부하의 보상서셉턴스의 연결은 그림 2-9와 같다.

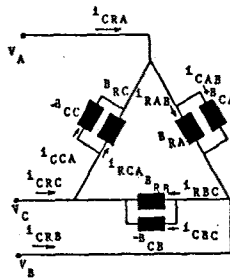


그림 2-9. 부하에 대한 보상 서셉턴스의 연결  
Fig. 2-9. Connection of Compensation Susceptance for Load

그림 2-9는 부하의 서셉턴스량과 크기가 같고 역방향인 보상 서셉턴스를 연결한 회로이다. 이 보상 서셉턴스 회로가 고정 캐패시터와 ICR 리액터 회로가 된다. 이에대한 서셉턴스의 식을 역변환에 의한 상좌표로 변환하면 식 2-27 과 같이 선간 서셉턴스 값으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_{AB} \\ B_{BC} \\ B_{CA} \end{bmatrix} = -1/3 V \begin{bmatrix} 1 & h & -h^2 \\ -1 & h & h^2 \\ 1 & -h & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_m I_{LA} \\ I_m I_{LB} \\ I_m I_{LC} \end{bmatrix} \quad \text{--- 2-27}$$

식 2-27 은 부하의 페이저 선전류로 요구 되는 보상서셉턴스를 나타 낸 식 이다. 그림 2-10 은 ωL 이 1/ωC보다 적은 범위에서 부하에 대한 벡터도 를 나타낸 그림이다. 그림 2-10 의 (a)는 부하가 평형인 상태에서 부하의 각 선전류에 대하여 고정 캐패시터 전류가 부하에 대하여 과보상이 되면 과보상 된 크기만큼 역방향으로 ICR 리액터 전류로서 제어되어 단위역률로 보상 되는것을 나타낸 그림이다. 그림 2-10 의 (b)는 (a)와 같은 방법으로 불평평에 대한 보상 벡터도를 나타낸 그림이다.

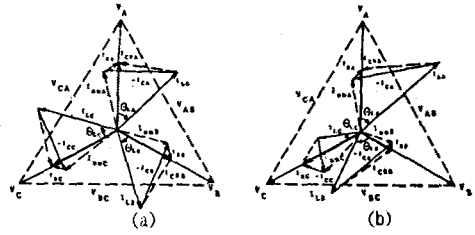


그림 2-10. 3상 결선의 보상 벡터도  
(a) 평형부하의 경우 (b) 불평형부하의 경우  
Fig. 2-10. Vector Diagrame for Compensation of 3 phase Connection  
(a) Balance Load (b) Inbalance Load

그림 2-11과 2-12는 불평형 부하일 경우 기준 입력전압에 대하여 피정사물레이선 한 것이다.

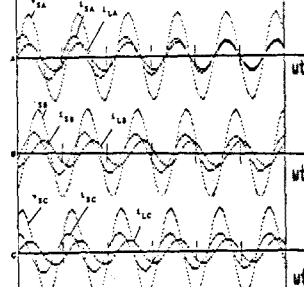


그림 2-11 각상 역률이 1..95..9일 경우 입력전압, 입력전류의 파형  
Fig. 2-11 Waveform of cos =1..95..9 for input voltage, input current and load current

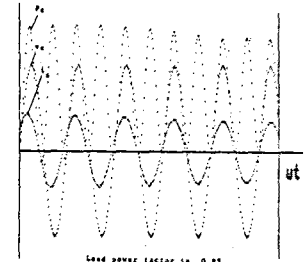


그림 2-12 부하 역률이.95인 경우 순간전력  
Fig. 2-12 Instantaneous power at load power factor is .95

### 3. 시스템의 구성

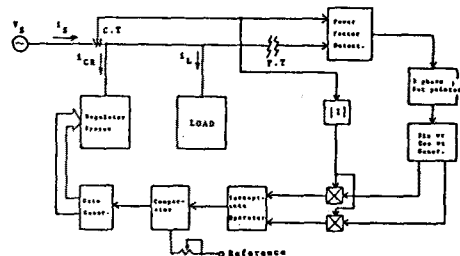


그림 2-13. 입력역률을 변수로 하는 보상서셉턴스 제어 시스템  
Fig. 2-13. Compensation Susceptance System by input power factor

그림 3-13은 입력역률을 변수로하는 제어시스템의 블록도로써 기준 입력전압 $v_s(t)$ 와 비교 입력 전류  $i_s(t)$ 의 양의 기울기가 역률편차 비교량에 가해진다. 역률편차 비교량에서 출력된 역률편차 비교량을 각 상의 서셉턴스값으로 변형시키기위하여  $\sin\omega t$ ,  $\cos\omega t$  값으로 나타나고 이를 부하전류와 곱셈연산을 하여 보상서셉턴스 연산기에 가해진다. 이 보상 서셉턴스값은 게이트 발생기에 가해져 여기서 출력된 게이트 조작량이 레귤레이터에 가해진다. 따라서, 레귤레이터에 가해진 게이트 점프각에 의하여 다이리스터 스위치가 동작하여 리액티브 임피던스를 가변시키는 시스템이다. 그림2-14는 이에대한 제어 블록선도이다.

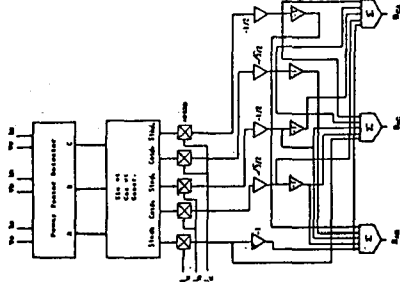


그림 2-14. 서셉턴스 연산 블록선도  
Fig. 2-14. Operation block diagram of Compensation Susceptance

3. 실험 결과 및 고찰

그림 3-1은 입력전압과 다이리스터 제어각에 따른 선전류  $i(t)$  파형을 1 상분에 대하여 나타낸 파형이다.

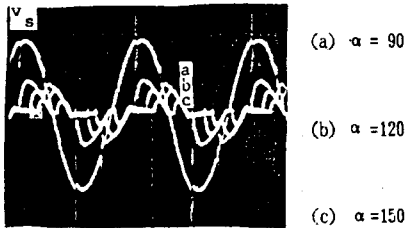


그림 3-2 제어각에 따른 TCR 레귤레이터의 1 상분에 대한 선전류의 파형  
Fig. 3-2 Line current waveform of TCR current for 1 phase with controlled angle

그림 3-2은 입력전압 $v_s(t)$ 에대한 보상된 입력전류  $i_s(t)$ 를 나타낸 파형이다. 여기서 볼 수 있는 바와같이 부하에 대하여 TCR 레귤레이터가 동작 되어서 입력 총합 역률이 단위 역률로 보상 되었음을 보여준다.

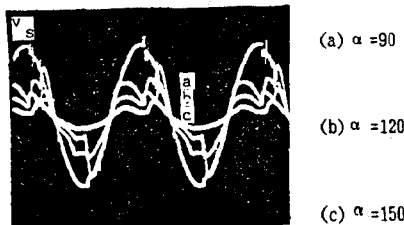


그림 3-2 입력전압 $v_s(t)$ 에 대한 보상된 입력전류  $i_s(t)$ 의 파형  
Fig. 3-2 Compensated waveform of input current  $i_s(t)$  for input voltage

그림 3-3은 기준전압에 대한 입력전류의 시변파형이며 그림 3-4는 부하 변화에 따른 보상된 입력전류특성을 나타낸다.

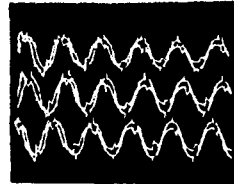


그림 3-3 기준 전압에 대한 입력전류( $i_s$ )의 시변파형  
Fig. 3-3 Time variable waveform of input current

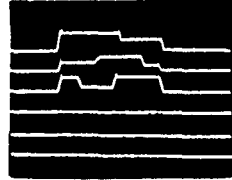


그림 3-4 부하변화에 따른 입력 특성  
Fig. 3-4 Input characteristics with load variation

4. 결론

본 논문에서 실험한 무효전력 보상장치는 고정 캐패시터와 다이리스터 위상 제어 리액터 (FC-TCR)을 사용하므로써, 무효전력을 진상에서 지상까지 연속적으로 제어할 수 있었고, 입력 역률을 제어변수로 하여 서셉턴스 이론을 도입한 3상 불평형 무효전력 보상 시스템을 제어할 수 있었다. 제어회로구성에 있어서 이알로그스자들로 구성됨으로써 신호 처리에 지연요소가 없이 실시간에에 우수한 특성을 나타냈다. 또한, 불평형 상태에서 각상별 배에 문제점으로 제기되는 결선을 통하여 실험한 결과 새이거 정정 편차 $\pm 2\%$ 정도의 오차를 갖는 단위 입력 역률을 유지할 수 있었다.

5. 참고 문헌

- (1) K. Komatsugi, T. Imura, " Harmonic Current Compensator composed of static power converter " IEEE PES Record, pp. 283 - 290, 1986
- (2) S. Nakomishi, " Analysis and Control Characteristics of thyristor and thyrode controllers with Purely Resistive Load " IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS - 272, No.3, 1986
- (3) Iaszlogyuyi, " Reactive Power Generation and Control by thyristor Circuits " IEEE Trans, Vol. IA - 15, No.5, Septem./oct. 1978
- (4) W. Shepherd, P. Zakihani, " Power factor correction in nonsinusoidal systems by the use of Capacitance ", J. phys. D. Appl. phys, Vol. 6. pp. 1850 - 1861, 1973
- (5) " Sibliography of static VAR Compensators working group 79;2 on static VAR Compensators in A.C Substations of the IELE Substation, Committe " M. M. Gaurilovic IEEE trans. on PAS Vol pas - 102, No.12, 1983
- (6) J. G. deoliveira, L. G. de. O. Origa, J. W. Resende, J. R. Cogo " Phase - Control and Three-Phase harmonic Calculations for Thyristor controlled Reactor Compensations " IFAC. control in power Electronics and Electrical Drive Lausanne, Switzerland, pp. 739 -734, 1983.
- (7) 서 영수, " 무효전력보상과 그 장치 " 전기설비, 5월 - 11월 특집, 1985