論文 11-4-7

동적전압보상기를 위한 정합 변압기의 돌입전류 제어

孫珍励†, 徐一東*, 田喜鐘**

Inrush Current Control of Matching Transformer for Dynamic Voltage Restorer

Jin-Geun Shon, Il-Dong Seo and Hee-Jong Jeon

요 약

본 논문에서는 동적전압보상기(DVR)를 구성하기 위한 정합 변압기의 돌입전류 제어기법을 제안하였다. DVR시스템은 배전계통에서 발생하는 순시적 전압강하를 보상하기 위한 직렬전압 주입장치로서, 임의의 전압을 생성하는 PWM 인버터와 전압 평활용 LC수동필터 및 절연을 위한 정합 변압기 등으로 구성된다. 그러나 정합 변압기의 사용은 변압기내에서 자속 포화현상에 의하여 정격의 수 배에 달하는 돌입전류가 발생하여 시스템의 절연파괴를 초래하고 이 때문에 변압기의 정격용량을 2배 정도로 초과하여 사용하게 한다. 따라서 본 연구에서는 정합 변압기의 자속 포화현상에 따른 돌입전류의 크기를 분석할 수 있는 새로운 모델링 분석기법 및 돌입전류의 크기를 제한하는 자화전류 제어기법을 제안하였다. 모의실험 및 실험을 통하여 제안된 DVR 제어기법의 타당성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes an inrush current control technique of matching transformer for configuration of dynamic voltage restorer(DVR). The DVR system consist of PWM inverter to inject arbitrary voltage, LC low pass filter as harmonic eliminator and matching transformer for isolation. However, the matching transformer has an excess of inrush current by magnetic flux saturation in the core. Due to this inrush current, the rating of matching transformers is double for needed nominal rating for protection of DVR. Therefore, in this paper, the modeling method of magnetic flux saturation is used to analyze a magnitude of inrush current, and additional current controller is used for PWM inverter output regulation. Simulation and experimental results are provided to demonstrate the validity of the proposed control method.

Key Words : Dynamic voltage restorer(DVR), matching transformer, magnetic flux saturation, inrush current

1. 서 론

근래에 전기품질(Power Quality)에 관심이 고조되어 다양한 종류의 전기품질 보상장치가 연구되고 있다.

†교신저자 : 정회원, 경원전문대학 전기제어시스템과 부교수
E-mail : jgshon@kwc.ac.kr
*정회원, 숭실대 전기공학과 박사과정
**정회원, 숭실대 전기공학부 교수
접수일자 : 2006. 3. 22 1차 심사 : 2006. 4. 14
2차 심사 : 2006. 5. 2 3차 심사 : 2006. 5. 15
심사완료 : 2006. 5. 24

전기품질의 중요성이 커진 이유는 송배전 계통에 전기적으로 민감한 부하들이 많아졌기 때문이다. 전기적으로 민감한 부하는 전력공급의 단순한 중단뿐 아니라 계통에서 공급하는 전압파형의 왜형에도 민감하게 반응한다. 전력계통의 전기품질 문제 중에서 가장 큰 영향을 미치는 것은 순시적 또는 순간적 전압강하(instantaneous (0.5~30[cycle]) /momentary (30[cycle]~0.5[s]) voltage sag; 이하 편의상 순시적 전압강하로 만 표현)로 알려져 있다[1-4].

순시적 전압강하는 배전계통의 지락사고, 낙뢰, 주변

계통의 순간적인 부하급증, 대형유도전동기의 기동, 낙뢰발생 등의 원인으로 발생하며[2], 이의 보상장치는 직렬로 전압을 주입하는 장치가 경제적인 측면에서 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 이에 대한 다양한 제품이 개발되어 여러 명칭이 사용되지만 최근에는 ABB 社에서 개발한 DVR(Dynamic Voltage Restorer)의 명칭이 통용되고 있는 실정이다[5,7].

이러한 DVR시스템은 부하에 공급되는 전압 중에서 순시적으로 전압강하가 발생한 크기만큼을 부하에 추가로 공급해주는 직렬 전압주입장치이다. 이의 구성은 임의의 전압을 발생시켜 줄 수 있는 PWM 인버터, 전압고조파 제거용 LC 수동필터, 절연 및 전압을 주입하기 위한 정합 변압기(matching transformer)와 전력저장 장치 등으로 이루어지며, 이의 DVR 시스템을 구현하고 운용하는 데에는 여러 세부적인 기술들이 매우 필요하다.

특히, 전기적 절연을 유지하면서도 계통과 연계하기 위한 전압 주입용 정합 변압기의 사용은 많은 문제점이 노출되는 구성요소이다. 정합 변압기는 철심 내부의 자속이 포화되어 정격 전류 이상의 과도한 자화전류가 흐를 수 있기 때문이다. 이러한 변압기의 포화문제는 변압기의 절연이나 용량이 문제가 될 수 있는데, 과거에는 이의 문제점을 해결하기 위하여 변압기의 용량을 필요한 용량의 2배정도 크게 설계하는 방법으로 해결하였으나 필요이상으로 큰 변압기를 사용하는 것은 경제적인 문제와 더불어 시스템의 전체 크기를 지나치게 커지게 할 수 있는 단점이 있다[6-7].

따라서 변압기의 포화문제는 민감 부하에 원활한 전압을 공급하기 위해서 뿐만 아니라 DVR의 인버터 보호를 위해서도 반드시 해결해야할 문제이기도 하다. 이를 위하여 본 논문에서는 정합 변압기의 등가회로에 기반한 자속포화의 새로운 검출기법을 제시하여 포화의 정도에 따른 돌입전류의 크기를 분석하는 기법과 변압기의 입출력 전류 관계에 기반한 자화전류 제어기를 구성하여 돌입전류를 제한하는 새로운 제어기법을 제안하였다. 돌입전류와 관계한 제안된 분석기법 및 제어기법을 사용하여 본 DVR시스템에 적용하였으며, Matlab Simulink를 이용한 모의실험 및 실험을 통하여 제안하는 기법의 타당성을 입증하였다.

2. DVR시스템의 구성

DVR시스템은 전원의 순시전압강하로부터 민감한 부하를 보상하기 위하여 사용되며 그림 1과 같이 보상시스템의 회로가 구성되어 보상전압(v_{comp})을 발생시켜 정합 변압기를 통하여 계통과 연계되는 시스템이다. 그림 2는 위의 DVR시스템과 연계된 전원과 부하의 전기적 등가회로를 나타낸 것으로 R_f, L_f, C_f는 각각 LC필터의 내부저항 및 인덕턴스, 커패시턴스 파라미터를 나타내며, 민감 부하는 R-L 직렬부하로 가정하면 이의 등가회로로 부터 시스템의 상태방정식을 식(1)과 같이 구할 수 있다.

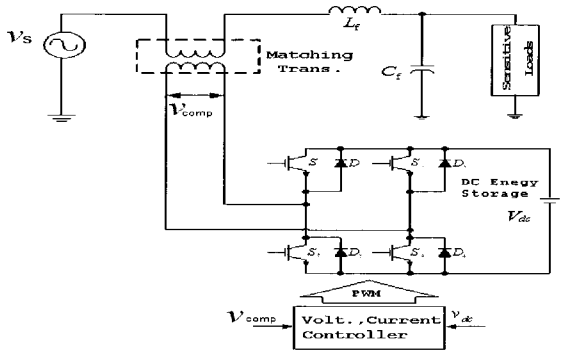


그림 1 DVR시스템의 회로구성
Fig. 1 Circuit with DVR system

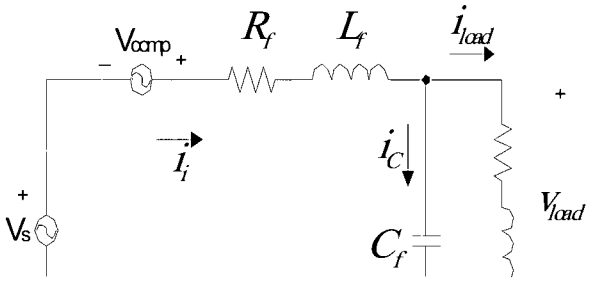


그림 2 DVR시스템의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of DVR system

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} i_i \\ v_{load} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} i_{load} \\ v_{load} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} v_s \\ i_{load} \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot v_{comp} \quad (1)$$

DVR시스템은 부하에 공급되는 전압을 제어하는 것이 목적이므로 부하전압의 궤환이 필요하고 동특성을 향상시키기 위하여 인덕터 전류 혹은 커패시터 전류의 궤환을 이용하여 이중 궤환루프를 구성하여 제어기를 구성할 수 있다. 그림 3은 계수조정 P게인 (K_i)의 인버터와 정합 변압기가 결합된 DVR의 제어회로 모델을 표현한 그림이다. 이는 보상전압의 지령치 V_{ref}에 대

하여 부하전류의 외란(i_d) 및 부하전압 (V_{load})을 고려하여 인버터 제어기가 동작되게 된다.

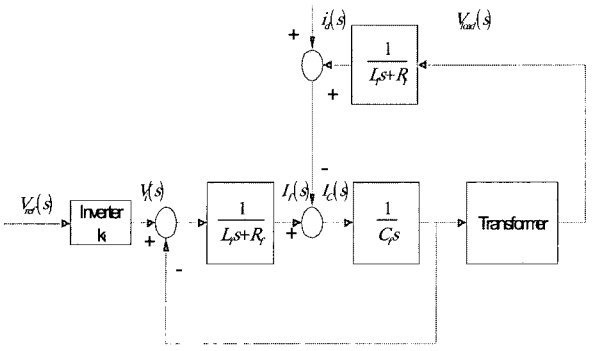


그림 3 DVR 인버터의 제어기 모델
Fig. 3 Controller Mode of DVR Inverter

3. 정합 변압기의 자속 포화현상 모델링

3.1 선형 동작영역에서의 변압기 모델링

DVR에서의 보상된 전압은 부하시스템의 보호 및 절연 등의 목적을 위해 배전계통 연계용 정합 변압기의 연결이 필요하다. 그러나 이러한 변압기의 사용은 인버터로부터 인가되는 스위칭 전압 및 직류전압의 옵셋 여부에 따라 변압기 내부의 자속에 포화 현상이 발생한다. 이 때문에 변압기 내부에는 돌입전류 및 과전류가 흘러서 시스템을 파괴하고 특히 DVR 인버터 출력전압에는 과도한 스파이크 전압이 인가되어 변압기의 절연을 파괴한다.

따라서 본 논문에서는 변압기의 포화 현상에 따른 돌입전류의 크기변화를 모의실험 할 수 있도록 수학적 모델링을 수행한다. 이를 위한 변압기는 단상 2권선 변압기로 설정하며, 이의 등가회로 모델은 그림 4와 같다.

그림 4의 등가회로로부터 변압기 1,2차 측의 전압 (v_1, v_2)방정식을 구하면 식 (2),(3)과 같다. 여기서 변압기 1,2차 측의 전류 및 자속은 각각 i_1, i_2 및 λ_1, λ_2 이고, 저항은 r_1, r_2이다. 변압기 2차 측의 전압 및 자속, 전류 등은 1차측에 대하여 환산하여 표현한다.

$$v_1 = i_1 r_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad [V] \tag{2}$$

$$v_2 = i_2' r_2 + \frac{d\lambda_2'}{dt} \quad [V] \tag{3}$$

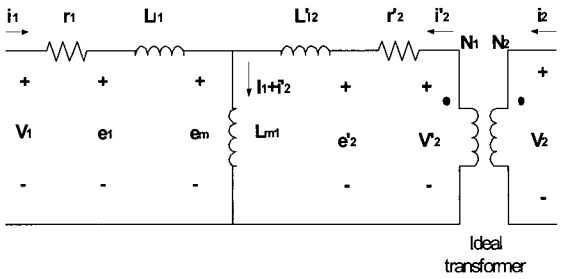


그림 4 변압기의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of transformer

또한 변압기의 자속은 쇄교자속과 1,2차 측 누설 인덕턴스 (L_{l1}, L_{l2}') 및 상호인덕턴스 (L_m) 등으로 표현할 수 있다. 변압기의 1차 측에 대하여 1,2차 측의 자속 및 전류 그리고 상호 쇄교자속(λ_m)을 구하면 식 (4)에서 식 (8)까지와 같다.

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + \lambda_m \quad [Wb] \tag{4}$$

$$\lambda_2' = L_{l2}' i_2' + \lambda_m \quad [Wb] \tag{5}$$

$$i_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_m}{x_{l1}} \quad [A] \tag{6}$$

$$i_2' = \frac{\lambda_2' - \lambda_m}{x_{l2}'} \quad [A] \tag{7}$$

$$\lambda_m = L_m (i_1 + i_2') \quad [Wb] \tag{8}$$

이러한 관계식으로부터 상호 쇄교자속 λ_m을 다시 구할 수 있다. 즉 식 (4)와 식 (5)에서 i_1과 i_2'를 구하여 대입하면 식 (9)이 된다.

$$\lambda_m = L_M \left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L_{l2}'} \right) \quad [Wb], \quad \frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{l1}} + \frac{1}{L_{l2}} \tag{9}$$

또한 식 (2),(3),(6),(7)로 부터 λ_1, λ_2'를 다시 구하면 다음 식(10),(11)과 같다.

$$\lambda_1 = \int v_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_m}{L_{l1}} r_1 \, dt \quad [Wb] \tag{10}$$

$$\lambda_2' = \int v_2' - \frac{\lambda_2' - \lambda_m}{L_{l2}'} r_2 \, dt \quad [Wb] \tag{11}$$

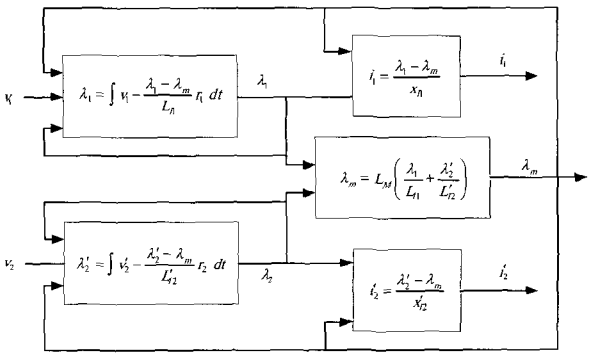


그림 5 변압기의 파라미터 모델링(선형영역 모드)
Fig. 5 Parameter modeling of transformer (Linear Operation Mode)

따라서 식 (6)에서부터 식 (11)을 이용하여 변압기의 전압 및 전류의 입출력 관계와 1,2차 쇄교자속 및 상호 쇄교자속 등의 파라미터 모델을 구할 수 있으며 이의 모델을 블록다이어그램으로 통합하여 나타내면 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그러나 이의 모델은 변압기의 자속이 포화 되지 않는 선형 동작 영역에서의 모델이고 변압기의 자속이 포화 되었을 때 즉 비선형 동작영역에서의 파라미터는 구할 수 없으므로 변압기의 자속이 포화 되었을 때의 변압기 모델을 포함시켜야 한다[6].

3.2 비선형 동작영역에서의 변압기 모델링

비선형영역에서의 변압기 자속포화를 모델링 하는 방법에는 해석적 및 근사적 방법을 도입할 수 있는데, 본 논문에서는 다음과 같은 방법으로 모델링할 수 있다. 즉 변압기 철심의 포화 현상은 기본적으로 변압기의 상호 인덕턴스 때문에 발생한다는 근거에 의한다. 이때, 변압기 권선의 누설인덕턴스는 그 영향은 작으므로 무시하고 또한 철손을 무시한 상태에서 무부하 변압기의 개방시험을 한다면 변압기 1차측 권선에 흐르는 전류를 구할 수 있다.

변압기 1차측의 자화 전류 $I_{m,rms}$는 변압기의 1차 권선 임피던스 $r_1 + j\omega L_{l1}$에서 전압강하를 일으키지만 자화 임피던스($x_{m1} = \omega L_{m1}$)는 매우 크므로 자화 임피던스의 양단에 발생하는 1차 권선의 임피던스 전압강하보다 매우 크다. 따라서 1차 권선의 임피던스 전압강하는 무시한다. 또한 변압기 개방시험 조건에서는 변압기의 2차 권선 전류가 흐르지 않으므로 이러한 조건들 하에서는 $V_{1,rms} \approx I_{m,rms} x_{m1}$이라 놓을 수 있다. 변압기가 포화되지 않은 동작 영역에서는 $V_{1,rms}/I_m$의 비율이 일정한 상수이지만 변압기의 포화가 진행될수록 이러한 $V_{1,rms}/I_m$의 비율은 점점 작아진다.

따라서 변압기의 파라미터 모델에 철심의 포화현상을 포함시키려면 상호 리액턴스의 값을 매 계산시마다 변경하는 방법을 생각할 수 있다. 매 스텝마다 자화 인덕턴스 x_m^{sat}를 갱신하는 방법은 매 스텝마다 포화되지 않았을 때의 자화 인덕턴스 x_m^{unsat}에 적절한 비례상수 k_s를 곱해주는 방법으로 생각할 수 있다. 즉 변압기 개방회로 시험에서는 변압기 1차 권선의 임피던스 $r_1 + j\omega L_{l1}$에 의한 전압강하는 무시하므로 $V_{1,rms} \approx E_{m,rms}$라 놓을 수 있다. 여자 자속이 정현적으로 변화한다면 식 (2)와 식 (8)에 의하여 $E_{m,rms} = \omega\lambda_{m,rms}$가 된다.그러므로 변압기 개방회로의 특성 곡선에 대하여 전압의 축은 쇄교자속 $\omega\lambda_{m,rms}$로 간주할 수 있으며 이의 관계를 그림 6과 나타낼 수 있다.

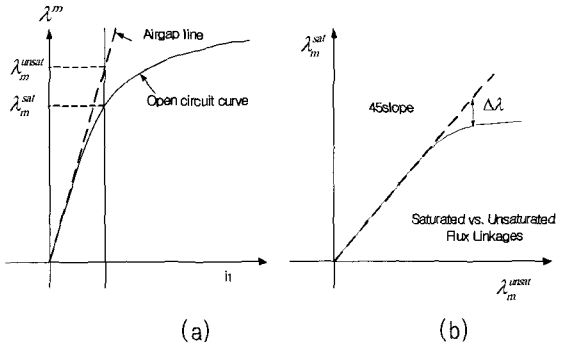


그림 6 변압기의 포화 특성곡선
Fig. 6 Saturation curve of transformer

그림 6(a)에서의 'Airgap-line'은 자화 인덕턴스 x_{m1}^{unsat}가 변화하지 않는 경우이다. 변압기의 자화 인덕턴스 이 변화 하는 경우는 위의 곡선에서 곡선의 임의 지점의 기울기로써 구할 수 있고, 비례상수를 이용하여 포화 현상을 표현한다면 식 (12)와 같다.

$$k_s = \frac{\lambda_{m,rms}^{sat}}{\lambda_{m,rms}^{unsat}} \quad \text{or} \quad \frac{I_{m,rms}^{unsat}}{I_{m,rms}^{sat}}, \quad k_s \le 1 \tag{12}$$

변압기 자속이 포화된 동작 영역에서의 자화 리액턴스의 유효값 x_{m1}^{sat}을 $\lambda_{m,rms}^{sat}/I_{m,rms}^{sat}$의 비율로 표현한다면 식 (13)과 같다. 이러한 경우에는 현재의 변압기 쇄교

자속 λ_m^{sat}는 포화 되지 않는 가상의 경우의 λ_m^{unsat}로부터 결정된다.

$$k_s = \frac{\lambda_{m,rms}^{sat}}{I_{m,rms}^{sat}} \frac{I_{m,rms}^{sat}}{\lambda_{m,rms}^{unsat}} = \frac{x_{m1}^{sat}}{x_{m1}^{unsat}} \tag{13}$$

변압기 쇄교자속이 포화 된 경우와 포화되지 않은 경우의 차이를 $\Delta\lambda$ 라 놓으면 변압기의 쇄교자속은 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_m^{unsat} = \lambda_m^{sat} + \Delta\lambda \quad [Wb] \tag{14}$$

여기서, $\Delta\lambda$ 의 값은 그림 6의 그래프에서 볼 때 1사분면에서는 양수이고 3사분면에서는 음수이다. $\Delta\lambda$, λ_m^{unsat}, λ_m^{sat} 사이의 관계는 변압기의 개방회로 자화곡선으로부터 구할 수 있다. 그림 6(a)에서 볼 수 있듯이 변압기의 무부하 1차 권선 전류 i_1이 주어지면 그에 상응하는 λ_m^{sat}과 λ_m^{unsat} 을 구하여 그림 6(b)와 같은 관계 곡선을 얻을 수 있다.

이러한 관계를 이용하여 포화된 쇄교자속을 해석적 함수를 이용하여 자화 전류를 근사화 하는 방법 즉 돌입전류의 크기를 제어하기 위한 기본 작업은 상호 쇄교자속 값이 포화 되었을 때와 포화 되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하면 된다. 우선, 식 (8)을 쇄교자속이 포화된 경우와 포화 되지 않은 경우로 나누어 생각해 본다면 포화되지 않은 쇄교자속의 식은 식 (12)을 그대로 이용하여 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\lambda_m^{unsat} = L_m^{unsat}(i_1 + i_2') \quad [Wb] \tag{15}$$

유사한 방법으로 식 (6),(7)을 포화된 자속의 항을 이용하여 표현하면 식 (16),(17)과 같다.

$$i_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_{l1}} \quad [A] \tag{16}$$

$$i_2 = \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_{l2}'} \quad [A] \tag{17}$$

식 (16),(17)을 식 (15)에 대입하면 식 (18)을 얻을 수 있다.

$$\frac{\lambda_m^{unsat}}{L_{m1}^{unsat}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_{l2}'} \tag{18}$$

여기서 식 (17),(18)의 λ_1와 λ_2'의 값은 포화된 값이다. λ_m^{unsat}를 $\lambda_m^{sat} + \Delta\lambda$ 로 치환 하고 λ_m^{sat}에 관하여 정리하면 식 (19)을 얻는다.

$$\lambda_m^{sat} = L_M\left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L_{l2}'} - \frac{\Delta\lambda}{L_{m1}^{unsat}}\right) \quad [Wb] \tag{19}$$

식 (19)로 부터 자속이 포화되지 않은 경우의 L_M을 구하면 식 (20)과 같다.

$$\frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_{m1}^{unsat}} + \frac{1}{L_{l1}} + \frac{1}{L_{l2}'} \tag{20}$$

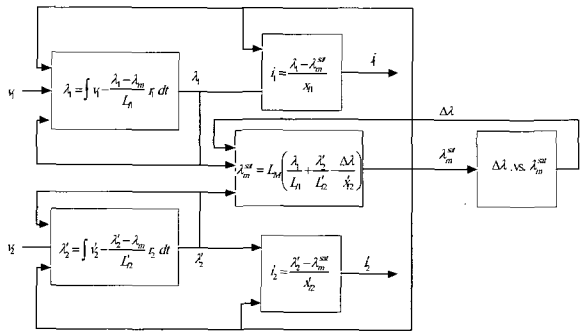


그림 7 변압기의 파라미터 모델링(포화현상 포함)
Fig. 7 Parameter modeling of transformer (with saturation Mode)

따라서 변압기 내부자속이 선형 동작 영역에 있는 경우와 비교하여 포화되는 경우에는 식 (19)에서 알 수 있듯이 $\Delta\lambda$ 이 결정되어야 변압기 내부의 자속을 표현할 수 있다. 식 (19)와 같은 표현의 장점은 L_M과 L_{m1}^{unsat}이 상수라는 점이다. 이렇게 변압기 철심 내부의 자속이 포화 되는 경우를 포함하여 변압기를 모델링 하면 그림 7과 같고 그림 5와 비교하여 볼 때 λ_m^{sat}로부터 $\Delta\lambda$를 계산해 낼 수 있다.

3.3 변압기의 여자전류의 제어

앞 절에서 논의된 바와 같이 변압기의 포화 현상에 의하여 과도한 여자 전류가 발생하며 이를

억제할 필요성이 있다. 본 논문에서는 변압기의 자속이 포화 되었을 때에 변압기의 여자전류가 과도하게 흐른다는 점에 착안하여 제어를 시도한다. 변압기 자속의 포화 현상이 발생할 때에 변압기의 여자전류 값이 일정 수준을 넘으면 그 궤환을 이용하여 변압기의 입력측의 전압에 변화를 주고 결과적으로 변압기 자속의 포화 현상을 단시간에 제거하고 변압기의 여자 전류를 제한하는 기법을 연구하였다.

변압기의 자속의 포화 현상을 억제하는 제어를 시도하면 가장 기본적으로 변압기의 자속을 직접 측정해서 그 정보를 궤환 받아야 한다. 그러한 경우 변압기의 자속을 측정하는 것이 매우 어렵다. 현실적인 어려움 때문에 변압기 내부의 자속을 수학적인 방법을 이용하여 추정하는 방법이다. 그림 4와 같은 일반적 등가회로에서와 같이 전력전달의 관점에서 볼 때 변압기의 여자전류는 변압기의 입출력 전류의 차이와 같다는 것을 알 수 있으므로 변압기의 여자전류가 정상상태에서의 전류치에 비하여 일정수준 이상으로 증가할 때에 변압기의 입력 전압의 크기와 기울기를 변형시켜 빠른 속도로 변압기의 포화 현상을 제어할 수 있다.

따라서 변압기의 여자전류 제어는 그림 3의 제어루프 모델과 그림 7의 변압기 포화현상 모델링을 이용하고, 인지하고 있는 변압기 파라미터 및 그림 6과 같은 개방회로의 자화전류 특성 곡선을 이용하여 변압기의 여자전류와 쇄교자속의 포화 현상을 고찰하고 이와 관련 제어기를 구성할 수 있다.

그림 8에 돌입전류를 억제하기 위한 제안된 여자전류의 제어기를 나타내었다. 여자전류의 제어모델은 변압기의 1차 전류와 2차 전류의 차이를 궤환으로 이용하였다. 변압기의 1차 전류와 2차 전류의 차이는 변압기의 여자전류이며, 변압기의 여자전류와 자화전류는 철손의 영향 때문에 완전히 일치할 수는 없으나 거의 유사하다 할 수 있다.

특히 변압기의 쇄교자속이 포화되어 여자전류가 매우 커졌을 경우에는 변압기의 철손 전류의 영향이 미미하여 변압기의 여자전류와 변압기의 자화전류는 거의 같다고 볼 수 있다. 부하에 주입되는 전압의 제어는 그림 3에서 보인 전압제어 시스템을 이용하고 전체 지령전압에서 여자전류를 궤환 받아 인버터의 출력전압 제어에 이용한다.

4. 모의실험 및 실험의 결과

4.1 모의실험의 결과

본 절에서는 3장에서 논의된 정합 변압기의 내용확인 및 DVR의 전체적 동작확인을 위하여 모의실험을 수행하였다. 이는 Matlab의 Simulink를 이용하여 구성하였으며 그림 8에 기반한 그림 1의 실험장치와 동일하게 구성하였고 동일한 파라미터를 사용하였다.

이때 Voltage sag는 Matlab의 내부 클럭을 이용하여 일정 시간 동안 sag가 발생되도록 제어 전원을 모의하였으며 Powersym 라이브러리를 이용하여 인버터와 LC필터 및 변압기를 모의하였다. LC필터부의 인덕터는 3.1[mH], 커패시터는 100[F], 인덕터 권선저항은 0.1[Ω]으로 한다.

정합 변압기는 1,2차 권선저항이 1.1[Ω]과 1.3[Ω]으로 1,2차 누설인덕턴스는 동일하게 1.65 [mH], 그리고 철손저항 및 상호인덕턴스는 512[Ω]과 661[mH]로 설정하였으며, 110[V],500[VA]의 용량 및 1:1의 권선비를 사용하였다. 인버터는 돌입전류 억제 및 전압제어를 위하여 궤환신호를 검출하도록 하였고 10[kHz]의 PWM을 발생하도록 그림 8과 같이 커패시터 전류를 궤환한 이중루프제어기를 PSIM을 통하여 시뮬레이션 하였다.

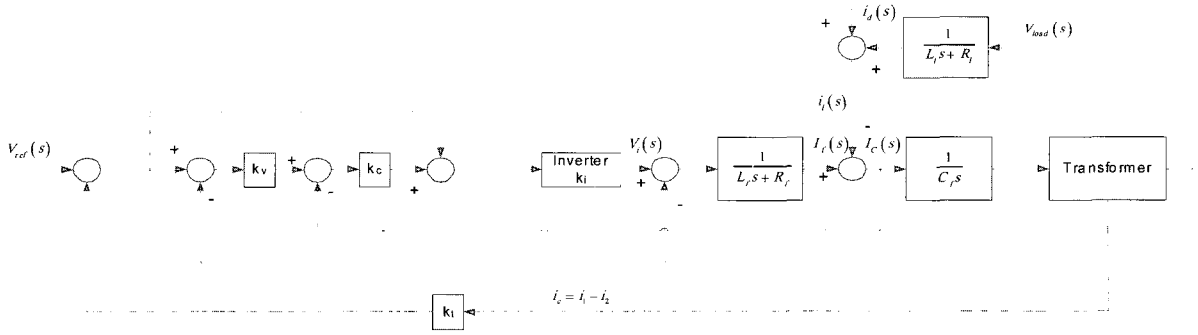
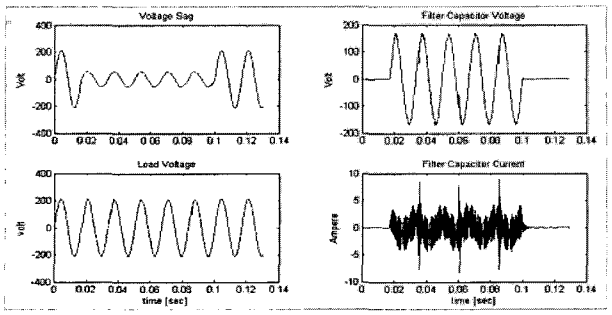
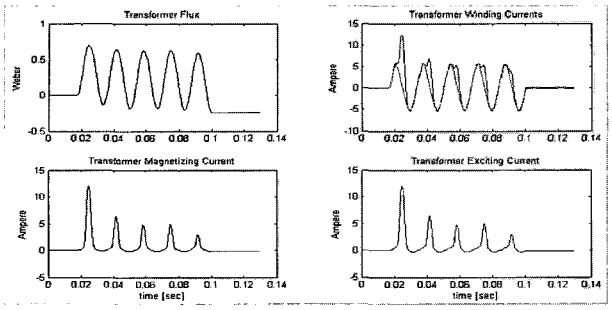


그림 8 여자전류 제어를 위한 DVR 제어시스템
Fig. 8 DVR control system for exciting current

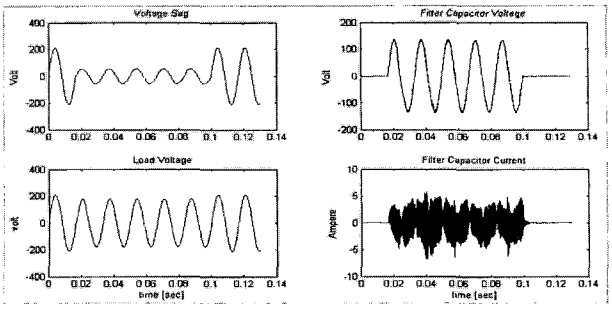


(a)전압 sag, 보상전압, 부하전압, 필터전류(순서:본문참조)

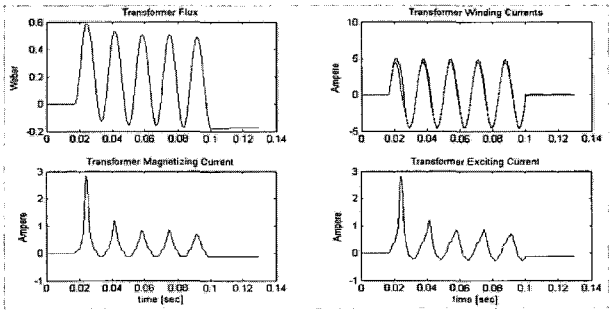


(b)변압기의 자속과 권선전류, 변압기의 자화 및 여자전류

그림 9 변압기의 비제어시 시뮬레이션 파형
Fig 9 Simulation waveform of transformer without controller



(a)전압 sag, 보상전압, 부하전압, 필터전류(순서:본문참조)



(b)변압기의 자속과 권선전류, 변압기의 자화 및 여자전류

그림 10 변압기의 제어기가 있는 경우 시뮬레이션 파형
Fig 10 Simulation waveform of transformer with controller

그림 9는 그림 8과 같은 전류제어기가 제어를 수행하지 않고 DVR 보상전압을 주입하는 경우의 파형이다. 그림 9의 (a)는 각각 순시전압강하 파형(상단 좌), 보상전압 주입파형(상단 우), 민감부하의 보상된 전압(하단 좌), 필터전류(하단 우)를 각각 나타낸 것이다. 이 경우는 민감부하에 전압sag가 보상되고 있지만 이는 그림 9의 (b)파형과 같이 변압기의 전류에 문제가 있다(변압기의 내부 자속(상단 좌), 권선전류(상단 우), 자화전류(하단 좌), 여자 전류(하단 우).

변압기의 자화 전류와 여자 전류의 차이는 철손에 기인한 것이며 (b)의 경우를 살펴보면 변압기의 내부 자속이 정격의 2배까지 포화되고 있으며, 이 때문에 변압기의 여자 전류와 자화 전류는 정격의 수 배에 달하는 첨두치를 보이며 이로 인하여 변압기의 1차 권선에서는 변압기의 무부하 여자 실험에서나 볼 수 있는 심각한 돌입 전류가 발생함을 알 수 있다.

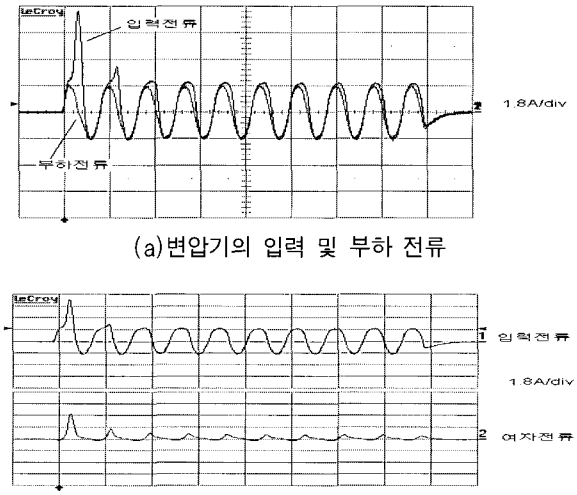
그림 10은 그림 8과 같은 전류제어기가 제어를 수행하면서 DVR 보상전압을 주입하는 경우의 파형이다. 이는 그림 9와 같은 순서로 나타내었으며, 그림 9의 경우와 같이 전반적으로 전압의 보상이 잘 되고 있으므로 앞의 경우와 큰 차이를 볼 수 없다. 그러나 그림 9(b)에서 여자전류와 자화 전류를 살펴 보면 제어를 하지 않은 경우에 비하여 초기의 첨두치의 최대값도 작을 뿐만 아니라 빠른 시간 안에 정상상태에 가까워지고 있음을 볼 수 있다. 전체적으로 변압기의 여자전류왜곡이 현저히 줄어들고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 변압기의 1차 권선과 2차 권선에 흐르는 전류의 파형의 오차가 최소화 되고 있음을 볼 수 있다.

4.2 실험결과

실험을 위한 전압 sag의 모의는 선로임피던스의 단락회로를 사용하였고 부족전압은 그림 1과 그림 8과 같은 시스템 제어기로 구성하여 보상하게 하였다. 이때의 인버터는 약 1[kVA], 10[kHz]의 IGBT 타입을 시제작하여, 전압 sag가 발생하는 시점에서 인버터의 각 제어기가 작동하고 정합 변압기를 통하여 부하와 연결이 되도록 DSP의 출력 신호를 이용하여 제어하도록 단상 시스템으로 구성하였다. 이때의 제어기 모듈 3개를 조합하여 3상 인버터 시스템과 연동하도록 하면 12레그 타입의 3상 DVR시스템을 구성할 수 있다.

그림 11과 그림 12의 실험파형은 전압sag 제어부를 제거하고 50[Ω]의 부하저항과 변압기만 연결하여 돌입

전류 억제 실험을 수행한 파형이다. 변압기에 주입된 전압의 첨두치가 100[V]인 경우로 이 주입전압으로는 변압기의 포화가 발생하지 않아야 하는데 주입전압의 위상이나 변압기 내부의 잔류 자속에 따라 변압기의 포화현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다.



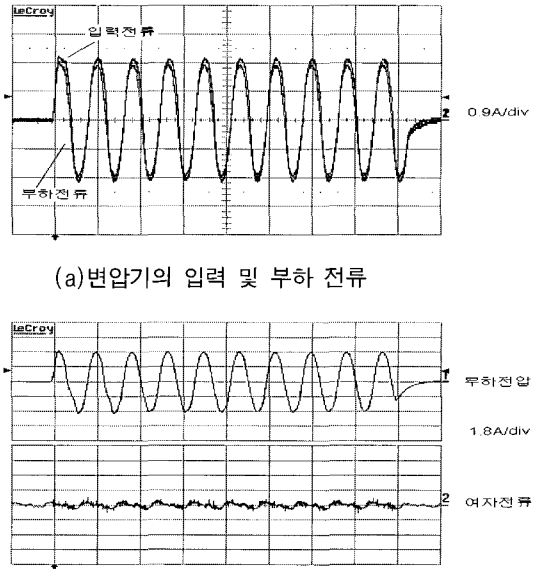
(a)변압기의 입력 및 부하 전류

(b)변압기의 입력 및 여자 전류

그림 11 제어기가 없는 경우 변압기의 전류
Fig. 11 Transformer current without controller

그림 11(a)는 여자전류 제어기가 없는 경우 변압기의 1차, 2차 권선전류의 파형이다. 변압기 1차 권선전류의 최대 첨두치는 5.44[A] 이고 정상상태에서는 2.1[A] 이다. 모의실험에서 확인한 바와 같이 초기에 매우 큰 여자전류가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 동일조건에서 그림 11(b)는 변압기의 1차 권선전류와 계산한 여자전류의 파형을 보인 것이다. 그림 12는 그림 11과 동일조건에서 변압기의 여자전류 제어기를 수행하는 경우이다. 그림 12(a)는 변압기 1차 권선전류와 2차 권선전류의 파형으로, 여자전류의 첨두치는 매우 낮아지고 안정화 되어 있다. 마찬가지로 그림 12(b)는 스파이크(spike)현상이 전혀 없는 부하전압과 여자전류의 파형을 나타낸 것으로 여자전류가 ±0.5[A] 이내로 효과적으로 잘 제어되고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 지락사고 모의저항의 연결로 인하여 전압 sag가 발생하는 전원 및 DVR의 전압이 보상된 부하의 전압파형을 나타낸 것이다. 130[Vpeak] 이후 발생한 전압sag를 검출하여 65[Vpeak]전압을 주입하여 부하에 정상적인 전압을 공급하고 있음을 알 수 있으며, 이때 주입전압의 스파이크 제거에 의하여 부하전압이 안정화되고 돌입전류 역시 억제됨을 유추할 수 있다.



(a)변압기의 입력 및 부하 전류

(b)변압기의 입력 및 여자 전류

그림 12 제어기가 있는 경우 변압기의 전류
Fig. 12 Transformer current with controller

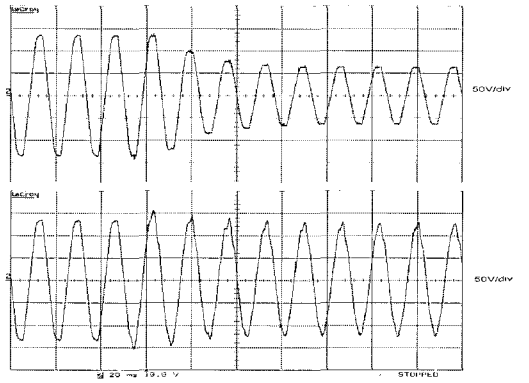


그림 13 전원전압과 보상된 부하전압
Fig. 13 Voltage waveform of source and load

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 순시전압강하를 보상하는 단상 DVR시스템의 정합 변압기 포화 현상을 최소화 하는 효과적인 제어기법을 제안하였다. 변압기의 포화 현상은 변압기에 과도한 여자전류를 유발시키게 된다. 이러한 과도한 여자전류는 결국 DVR이 감당해야 하므로 장치의 전체 성능과도 연결될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 자속포화 현상에 따른 돌입전류의 해석적 모델링 기법을 제시하였고 이

를 바탕으로 여자전류 제어기법을 제안하였다. 이의 제어기법은 변압기 권선의 1차 전류와 2차 전류의 차이에 의하여 여자전류를 제어하는 기법으로 간단한 제어기 구성으로 성능을 높일 수 있는 것이다. 다양한 시뮬레이션 및 실험 결과는 DVR의 출력 전압과 전류제어를 원활히 수행 할 수 있음을 나타내고 있다.

이 논문은 산업자원부의 '전력산업연구개발사업'(R-2004-0-033)'의 연구비 지원에 의하여 연구 되었음.

참 고 문 헌

[1] P. Wang, N. Jenkins, and M. H. J. Bollen, 'Experimental investigation of voltage sag mitigation by an advanced static var compensator,' IEEE Trans.l Power Delivery, vol. 13, pp. 1461~1467, Oct. 1998.

[2] M. F. Alves, T. N. Ribeiro, 'Voltage sag: an overview of IEC and IEEE standards and application criteria,' Proceedings of IEEE Conference on Transmission and Distribution, 1999, Vol. 2, pp. 585~589.

[3] S. Nilsson, 'Special application considerations for custom power systems,' in Proc. IEEE PES Winter Meeting, New York, Jan/Feb. 31/04, 1999, pp. 1127~1130.

[4] Ying-Yu, Shin-Liang Jung, 'Full Control of a PWM DC-AC Converter for AC Voltage Regulation,' IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 34, No. 4, October 1998, pp. 1218~1226.

[5] R. Buxton, 'Protection from voltage dips with the dynamic voltage restorer,' in IEE Half Day Colloquium on Dynamic Voltage Restorer, London, U.K., 1998, Dig. No. 1998/189.

[6] Trutt, F. C., Erdelyi, E. A., and Hopkins, R. E., 'Representation of the Magnetization Characteristic of DC Machines for Computer Use,' IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 87, No. 3, 1968, pp.665~669.

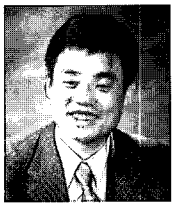
[7] D. Mahinda Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, 'Control and Analysis of a New Dynamic Voltage Restorer Circuit Topology for Mitigating Long Duration Voltage Sags,' Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the , Volume 2, 13-18 Oct. 2002, pp. 1105~1112.

[8] 손진근 외, '개선된 전압 Sag 및 위상 검출기법에 의한 동적전압보상시스템,' 전력전자학술대회 논문집, pp. 185~188. 2005. 7.

[9] 손진근 외, 'THD를 고려한 DVR 시스템의 LC필터 설계,' 전력전자학술대회 논문집, pp. 490~493. 2005. 7.

[10] 김희중 외, '전력품질 향상기기의 실증시험을 위한 2 MVA SSFG(Sag Swell Flicker Generator) 개발,' 전력전자학회 논문지, 1229-2214, 제10권 제6호, pp. 626~633. 2005.

저 자 소 개



손진근(孫珍劤)

1990년 숭실대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992~1995 현대중공업(주) 중앙연구소 주임연구원. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2002년 2~2003. 2 일본 (국립) 가고시마대학 해외 Post-doc. 1997~현재 경원전문대학 전기제어시스템과 부교수.

서일동(徐一東)

2005년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005. 9~현재 숭실대 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 (주)도엘산업 대표이사.

전희종(田喜鍾)

1975년 숭실대 전기공학과 졸업. 1977년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977년~1981년 공군사관학교 전자공학과 교수부. 1987년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1995년~1996년 Univ. of Victoria. CA. 객원교수. 2002년 당 학회 부회장 역임. 1983년~현재 숭실대 전기공학부 교수.