

Magnetic Flux Saturation Analysis of Matching Transformer Considering Characteristic of Dynamic Voltage Restorer(DVR)

孫 珍 勳[†] · 金 東 俊* · 康 珉 九* · 田 喜 鍾**
 (Jin-Geun Shon · Dong-joon Kim · Min-Gu Kang · Hee-Jong Jeon)

Abstract—This paper analyses magnetic flux saturation of matching transformer considering characteristic of dynamic voltage restorer(DVR) system to solve voltage sags which are considered the dominant disturbances affecting power quality. This DVR consist of PWM inverter to inject arbitrary voltage, LC low pass filter and matching transformer for isolation and grid connection. However, the matching transformer has an excess of inrush current by magnetic flux saturation in the core of transformer. Due to this inrush current, the rating of matching transformers is double for needed nominal rating for protection of DVR. Therefore, in this paper, an advanced modeling method of magnetic flux saturation is used to analyze a magnitude and characteristic of magnetizing current. Simulation and experimental results considering characteristic of DVR system are provided to demonstrate the validity of the proposed analysis method.

Key Words : Matching Transformer, Magnetic Flux Saturation, Dynamic Voltage Restorer(DVR), PWM Inverter, Inrush Current, Modeling Method

1. 서 론

전력IT 및 정보통신기기 등 전기의 품질에 매우 민감한 부하장치가 계속 늘어남에 따라 전압의 크기변동에 대한 보상의 중요성도 동시에 대두되고 있다. 전압의 크기변동 문제는 순시적(instantaneous) 또는 순간적(momentary)인 전압강하에 대하여 이를 동적으로 보상할 수 있는 동적전압보상기가 효과적이라고 최근에 널리 인식되고 있다[1-3]. 이의 동적전압보상기는 전원계통에 순간적인 전압강하나 전압상승이 발생하였을 때 이의 전압이 변동하는 만큼을 순시적으로 보상하여 부하측에 전압을 일정하게 유지시켜 주는 역할을 한다.

이러한 동적전압보상기는 순시적인 전압강하(voltage sag)의 순간에 부족한 전압을 직렬로 주입하는 장치가 경제적인 측면에서 효과적인 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 다양한 제품이 개발되어 여러 명칭이 사용되고 있지만 최근에는 ABB社에서 개발한 DVR(Dynamic Voltage Restore)의 명칭이 통용되고 있다[4]. 이러한 DVR 시스템의 구성은 임의의 전압을 발생시켜 줄 수 있는 PWM 인버터, 절연 및 직렬전압을 주입하기 위한 매칭변압기(matching transformer), LC필터 및 DC 전력저장 장치 등으로 이루어진다[3,6,8].

DVR의 가동운전은 정상시의 정상 전압에서는 대기상태

(stand-by)에 있다가 순시 전압강하가 발생하는 동안 IEEE 규격 (1159) 등의 규정[9]에 따라 보통 1초 또는 3초 이내의 매우 짧은 시간에만 전압을 주입하는 장치이므로 이의 다이내믹 특성이 매우 양호하여야만 한다. 이러한 특성을 얻기 위해서는 전압의 검출기법 및 인버터의 속응성도 좋아야 하겠지만 무엇보다도 매칭변압기의 특성을 고려해야만 한다.

배전계통과의 절연 및 연계를 위한 매칭변압기의 사용은 DVR의 매우 짧은 동작기간 동안, 연동 동작을 하므로 과도상태의 다이내믹 특수성을 고려하여야만 한다. 이는 인버터에서 발생된 전압을 매칭변압기를 통하여 주입하는 과정에서 변압기 철심 내부의 자속 포화현상 때문에 정격 전류의 수 배 이상의 과도한 돌입전류가 흐르면서 시스템의 안전성을 저하시키며 이 때문에 변압기의 용량을 몇 배 이상으로 선정하는 등 많은 문제점 야기되고 있다[5,7,8].

따라서 DVR에서의 변압기 자속포화 문제는 사용 변압기의 절연 및 열화현상 가속 문제와 함께 적정 용량선정의 문제가 될 수 있으며, 전원공급 장치로 사용하는 인버터 시스템의 보호를 위해서도 이의 특성을 해석하여 포화의 정도에 따른 변압기의 여자 및 돌입전류의 크기를 분석하고 예측할 수 있어야만 한다.

이를 위하여 본 논문에서는 변압기의 포화현상을 해석할 수 있도록 새로운 수학적 모델링 기법을 제시하여 DVR용 매칭변압기의 특성을 해석하였다. 변압기의 선형동작 영역 및 비선형 포화영역에서 변압기의 자속모델을 구하여 무부하 및 부하의 조건에서 변압기의 전압, 자속 및 여자전류 등의 특성을 각각 해석하였다. 이의 타당성을 입증하기 위하여 축소모델 DVR을 구성하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 이의 결과를 통하여 매칭변압기의 자속포화현상 해

[†] 교신저자, 正會員 : 暎園大學校 電氣工學科 副教授 · 工博
 E-mail: shon@kyungwon.ac.kr

* 正會員 : 崇實大學校 電氣工學部 博士課程

** 正會員 : 崇實大學校 電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 6月 24日

最終完了 : 2008年 7月 26日

석에 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

2. 변압기의 자속포화 모델링

2.1 선형 동작영역에서의 변압기 자속모델

DVR의 전체시스템의 구성은 PWM 인버터, LC필터, DC 에너지저장장치, 매칭변압기 등으로 구성되어 있으며, 전압새그가 발생하는 순간 부족분의 보상전압을 매칭변압기를 통하여 민감부하에 일정 전압을 공급하는 시스템이며 이의 전체 구성도를 그림 1과 같이 나타내었다. DVR에서의 PWM인버터는 DC에너지 저장장치로부터 전력변환하여 교류출력으로 보상하고자하는 전압을 만들어주는 핵심 기능을 한다. 인버터 출력단 전압은 스위칭으로 인해 펄스파가 되기 때문에 이로부터 과형을 정현화하기 위한 고주파저용 LC 저역통과 필터를 설치한다.

그림 1과 같은 DVR에서의 매칭변압기는 민감 부하의 보호 및 절연 등의 목적을 위해서 필요한 중요한 구성요소이다. 그러나 이러한 변압기의 사용은 인버터로부터 인가되는 스위칭 전압 및 직류전압의 DC-offset성분 등의 영향에 따라 변압기 내부의 자속에 포화 현상이 발생한다. 이 때문에 변압기 내부에는 돌입전류 및 과전류가 흘러서 기기의 손상 및 파괴 등의 위험에 있을 수 있으며 특히 인버터 출력전압에는 과도한 스파이크 전압이 인가되어 변압기의 절연을 파괴할 수 있는 위험이 있다.

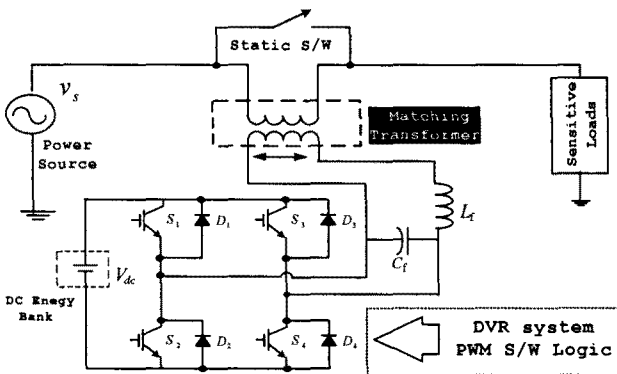


그림 1 동적전압보상기의 회로 구성도
Fig. 1 Circuit diagrams of DVR system.

특히 이러한 DVR시스템은 전압새그 순간에 절환(Static) 스위치가 ON에서 OFF로 절체되는 짧은 시간동안에 변압기의 과도한 돌입전류 때문에 시스템 전체의 용량을 증대하여야 하고 이 때문에 비경제적, 비효율적인 운전가동이 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 변압기의 포화현상에 따른 돌입전류 등의 크기 변화를 해석 및 모의실험을 할 수 있도록 수학적 모델링 기법을 제시하고 이의 결과를 전체 DVR에 연계하여 다양한 영향을 검토/제시하도록 한다.

DVR 매칭변압기의 모델은 단상 2권선 변압기로 설정하며 등가회로 모델은 그림 2와 같이 나타내었다. 그림 2의 등가회로로부터 변압기 1, 2차 측의 전압방정식을 각각 구하면 식 (1), (2)와 같다. 여기서 변압기 1, 2차 측의 전류 및 자속은 각각 i_1, i_2 및 λ_1, λ_2 이고, 저항은 r_1, r_2 이

다. 변압기 2차 측의 전압 및 자속, 전류 등은 1차 측에 대하여 환산하여 v'_2, i'_2, λ'_2 로 표현한다.

$$v_1 = i_1 r_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad [V] \quad (1)$$

$$v_2 = i'_2 r'_2 + \frac{d\lambda'_2}{dt} \quad [V] \quad (2)$$

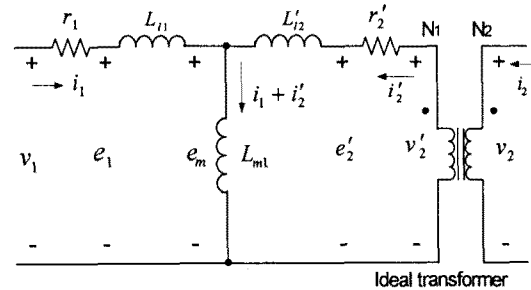


그림 2 매칭변압기의 등가회로 구성
Fig. 2 The Equivalent circuits of matching transformer.

또한 변압기의 자속은 상호 쇄교자속(λ_m)과 1, 2차 측 누설 인덕턴스 ($L_{\lambda 1}, L'_{\lambda 2}$) 및 상호인덕턴스 (L_m) 등으로 표현할 수 있다. 변압기의 1차 측에 대하여 1, 2차 측의 자속 및 전류 그리고 상호 쇄교 자속을 구하면 식 (3), (4), (5)와 같다

$$\lambda_{\lambda 1} = L_{\lambda 1} i_1 + \lambda_m \quad [Wb] \quad (3)$$

$$\lambda'_{\lambda 2} = L'_{\lambda 2} i'_2 + \lambda_m \quad [Wb] \quad (4)$$

$$\lambda_m = L_m (i_1 + i'_2) \quad [Wb] \quad (5)$$

이러한 관계식으로부터 상호 쇄교자속 λ_m 을 다시 구할 수 있다. 즉 식 (3)과 식(4)에서 i_1 과 i'_2 을 구하면 식 (6), (7)과 같고, 이를 식 (5)에 대입하면 식 (8)이 된다.

$$i_1 = \frac{\lambda_{\lambda 1} - \lambda_m}{L_{\lambda 1}} \quad [A] \quad (6)$$

$$i'_2 = \frac{\lambda'_{\lambda 2} - \lambda_m}{L'_{\lambda 2}} \quad [A] \quad (7)$$

$$\lambda_m = L_m \left(\frac{\lambda_{\lambda 1} - \lambda_m}{L_{\lambda 1}} + \frac{\lambda'_{\lambda 2} - \lambda_m}{L'_{\lambda 2}} \right) \quad [Wb] \quad (8)$$

$$\left(\text{단, } \frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{\lambda 1}} + \frac{1}{L_{\lambda 2}} \right)$$

또한 식 (1), (2), (6), (7)으로부터 λ_1, λ'_2 을 다시 구하면 다음 식 (9), (10)과 같이 정리할 수 있다.

$$\lambda_1 = \int v_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_m}{L_n} r_1 dt \quad [Wb] \quad (9)$$

$$\lambda_2' = \int v_2' - \frac{\lambda_2' - \lambda_m}{L_z} r_2 dt \quad [Wb] \quad (10)$$

따라서 식 (5)에서부터 식 (10)까지를 이용하여 변압기의 전압 및 전류의 입출력 관계와 1, 2차 쇄교 자속 및 상호 쇄교 자속 등의 파라미터 모델을 구할 수 있으며 이의 모델을 블록다이어그램으로 통합하여 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그러나 이 모델은 변압기가 이상적인 동작일때의 선형영역에서의 레퍼런스 모델이며 자속이 포화되었을 때의 파라미터를 포함하지 않고 있다. 따라서 변압기의 자속이 포화되었을 때의 비선형 동작영역에서의 파라미터를 포함시켜야만 동적해석이 가능하게 된다[5].

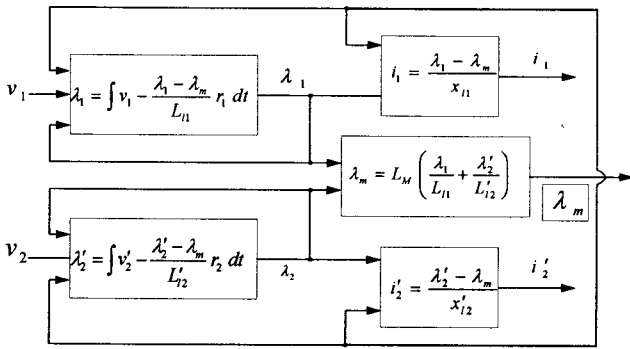


그림 3 선형 동작영역에서의 변압기 자속모델
Fig. 3 Magnetic flux modeling of transformer at linear operation.

2.2 비선형 동작영역에서의 변압기 자속모델

변압기 철심의 포화현상은 철심의 물리적 특성을 기본으로 하여 변압기의 상호 인덕턴스 때문에 발생한다. 변압기 철심의 포화 현상에서 변압기 권선의 누설 인덕턴스의 영향은 매우 작으므로 일반적으로 무시한다. 변압기 철심의 포화 현상은 일반적 변압기 개방 시험으로부터 얻어진 곡선을 이용하여 그림 4와 같이 모델링하고 모의실험 할 수 있다[7].

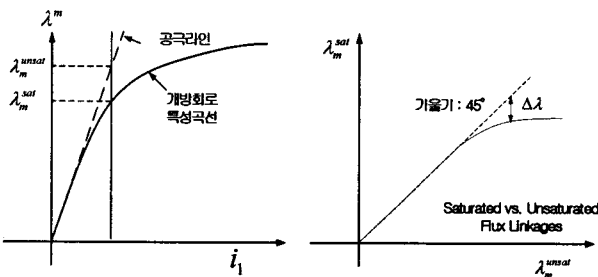


그림 4 변압기의 포화 특성곡선
Fig. 4 Saturation curve of the transformer.

변압기의 철손을 무시한다면 무부하시 변압기 1차측 권선에 흐르는 전류는 자화 전류로 간주할 수 있다. 자화 전

류는 변압기의 1차권선 임피던스 $r_1 + j\omega L_n$ 에서 전압강하를 일으키지만 자화 임피던스 ($x_{m1} = \omega L_m$)가 매우 크므로 자화 임피던스의 양단에 발생하는 1차권선 임피던스의 전압강하보다 매우 크다. 따라서 1차 권선 임피던스의 전압강하는 무시한다. 또한 변압기의 개방 시험 조건에서는 변압기의 2차 권선 전류가 흐르지 않으므로 이러한 조건들 하에서는 $V_{1,rms} \approx I_{m,rms} X_{m1}$ 이라 놓을 수 있다. 따라서 변압기가 포화되지 않은 정상 동작 영역에서는 $V_{1,rms}/I_m$ 의 비율은 점점 작아진다.

또한, 변압기 모델에 철심의 포화 현상을 포함시켜 모의 실험을 하려면 상호리액턴스의 값을 매 계산시마다 변경하는 방법, 포화된 쇄교 자속을 해석적 함수를 이용하여 자화 전류를 근사화 하는 방법, 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하는 방법 등을 생각할 수 있다[7,8]. 본 논문에서는 그림 4와 같이 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값을 이용하는 방법을 이용하였다.

이와 같은 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하는 방법에서는 자화 전류와 쇄교 자속의 관계가 명확하지 않아도 된다. 쇄교 자속을 상태변수로 선택하는 경우에는 이 방법이 유리하다. 그러나 이 경우도 쇄교 자속과 자화전류의 비선형성을 포함시키는 방법이 필요하다. 식 (5)를 쇄교 자속이 포화된 경우 (λ_m^{sat})와 포화되지 않은 경우로 나누어 생각해 본다면 포화되지 않은 쇄교 자속 (λ_m^{unsat})의 식은 식 (5)를 그대로 이용하여 식 (11)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\lambda_m^{unsat} = L_m^{unsat} (i_1 + i_2') \quad [Wb] \quad (11)$$

이와 같은 방법으로 식 (6), (7)을 포화된 자속의 항을 이용하여 표현하면 식 (12), (13)과 같다.

$$i_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_n} \quad [A] \quad (12)$$

$$i_2' = \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_z} \quad [A] \quad (13)$$

식 (12), (13)을 식 (11)에 대입하여 풀면 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\lambda_m^{unsat}}{L_m^{unsat}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_n} + \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_z} \quad (14)$$

여기서 식 (14)의 λ_1, λ_2' 의 값은 포화된 값이다. λ_m^{unsat} 을 $\lambda_m^{sat} + \Delta\lambda$ 로 치환하고 λ_m^{sat} 에 관하여 정리하면 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$\lambda_m^{sat} = L_m \left(\frac{\lambda_1}{L_n} + \frac{\lambda_2'}{L_z} - \frac{\Delta\lambda}{L_m^{unsat}} \right) \quad [Wb] \quad (15)$$

식 (8)로부터 자속이 포화 되지 않은 경우의 L_M 을 구하면 식 (16)과 같다.

$$\frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_{m}^{unsat}} + \frac{1}{L_A} + \frac{1}{L'_B} \quad (16)$$

따라서 변압기의 내부 자속이 선형 동작 영역에 있는 경우와 비교하여 변압기의 내부 자속이 포화되는 경우에는 식 (15)에서 알 수 있듯이 $\Delta\lambda$ 가 결정되어야 변압기 내부의 자속을 표현할 수 있다. 식 (15)와 같은 표현의 장점은 L_M 과 L_{m}^{unsat} 이 상수라는 점이다. 이렇게 변압기 철심 내부의 자속이 포화되는 경우를 포함하여 변압기를 모델링하면 그림 5와 같이 표현할 수 있고 그림 3과 비교해 볼 때 λ_m^{sat} 로부터 $\Delta\lambda$ 를 구할 수 있다. 따라서 그림 4에서와 같이 변압기의 무부하 1차 권선 전류 i_1 이 주어지면 그에 상응하는 λ_m^{sat} 과 λ_m^{unsat} 을 구하여 이의 관계곡선을 얻을 수 있다.

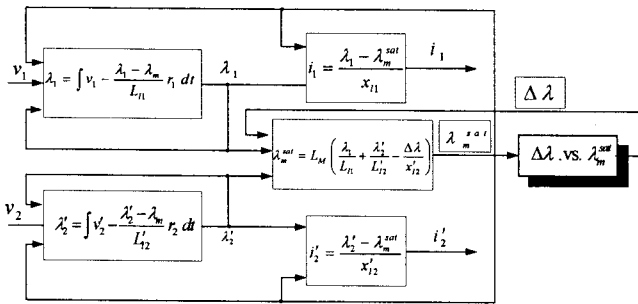


그림 5 비선형 동작영역에서의 변압기 자속모델
Fig. 5 Magnetic flux modeling of transformer at the non-linear operation.

3. 변압기 포화현상의 특성고찰

변압기의 자속포화 현상을 고찰하기 위해서는 우선적으로 변압기의 자속-자화전류 관계곡선을 구해야 하는데, 이는 변압기를 직접 설계하는 경우가 아니면 구하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 실험에 사용한 변압기의 파라미터와 포화 곡선을 실험과 해석적 방법을 이용하여 구하고 이를 모의실험에 이용하고자 한다.

본 논문에서 사용한 변압기의 용량은 110[V_{rms}], 500[VA]의 사양을 가진 단상 권선형 1:1 변압기이다. 먼저 기본적인 선형 등가회로의 파라미터 추출을 위한 측정에는 변압기 1차측에 정격 전압을 입력하고 2차측을 개방하여 전압과 전류를 측정하는 변압기 개방 시험과 변압기의 2차측을 단락하고 전압과 전류를 측정하는 단락 시험을 통하여 구하였다 [5]. 그 결과 그림 6과 같은 변압기 등가회로 파라미터를 얻었다. 각각의 파라미터는 등가 임피던스로 표시하였으며 단위는 [Ω]이다.

다음으로는 변압기의 포화 특성을 측정하기 위하여 변압기의 개방시험을 수행하였다. 변압기의 자속포화 현상은 여

자 임피던스가 비선형 동작영역에 있을 때에 발생하며, 이를 위한 변압기 개방시험은 변압기에 부하를 연결하지 않고 변압기의 2차측을 개방한 상태에서 변압기의 1차측에 정현 전압을 인가한 후, 변압기 1차측의 전압과 전류의 실효값을 측정하는 실험이다. 이러한 시험은 변압기의 2차전류 $i'_2 = 0$ 인 조건에서 변압기의 1차 권선에 인가되는 전압 v_1 을 점진적으로 증가시키면서 2차 전압 v'_2 와 자화 전류 i_1 을 측정하여 이루어진다.

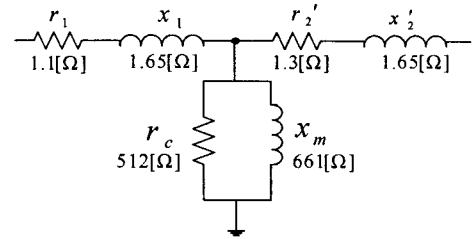


그림 6 사용된 변압기의 T형 등가회로
Fig. 6 T-type equivalent circuit of used transformer.

이렇게 변압기 개방 측정 실험을 통하여 구해진 변압기의 입력전압과 입력전류의 실효치 V-I 관계는 그림 7과 같이 나타났다. 그러나 그림 7의 전압-전류 관계 그래프에 의해서는 변압기의 포화현상 모의실험에 직접 사용할 수 없기 때문에 본 논문에서는 그림 7의 데이터를 반복적으로 이용하는 기법을 제시한 Prusty S.[7]의 연산기법을 이용하여 변압기의 여자전류와 자속과의 관계를 구하였다. 따라서 본 논문에서 사용한 변압기의 쇄교자속과 자화전류의 순시치의 관계를 나타낸 그래프는 그림 8과 같다.

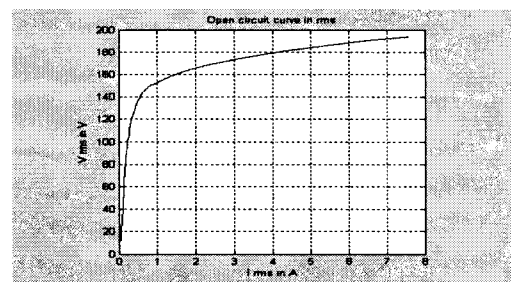


그림 7 변압기의 전압·전류 포화 곡선
Fig. 7 Voltage-current saturation curve of the transformer.

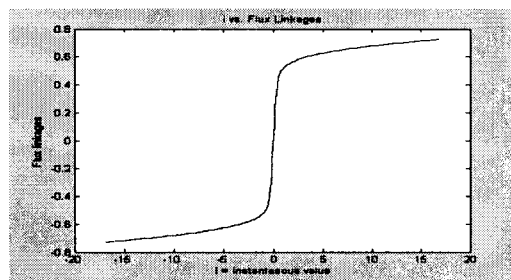


그림 8 변압기의 쇄교자속과 자화전류
Fig. 8 Flux linkage & magnetizing Current of the transformer.

변압기의 과여자 전류의 문제는 크게 변압기 2차측이 개방되어 있는 경우에 큰 돌입 전류가 흐르는 현상과 변압기 1차측에 인가되는 전압이 DC-offset을 가지는 경우 등에 과도한 여자 전류가 발생하는 문제로 생각할 수 있다. 따라서 이후의 모의실험에서는 그림 1의 DVR인버터 모델과 그림 5에 의한 변압기 포화모델 및 그림 6에서 구한 파라미터와 그림 8에서 구한 자화전류 곡선을 이용하여 변압기의 부하는 50[Ω]의 저항부하를 이용하여 변압기의 여자전류와 쇄교자속의 포화현상을 해석하였다. 변압기의 입력측 전압은 155[V_{peak}]로 설정하였으며 변압기의 비선형성을 이용할 수 있도록 6.5 Ver Matlab 시뮬레이션 툴을 이용하여 진행하였다.

그림 9, 그림 10은 자속의 포화현상이 발생하지 않는 정상상태에서의 전압, 자속, 전류 등을 고찰한 해석 결과파형이다. 그림 9는 자속의 포화현상이 발생하지 않는 경우의 변압기 1, 2차 측 전압과 자속을 나타낸 그림으로 변압기 입출력 전압과 자속 모두 정상적인 모양을 보이고 있다. 그림 10은 그림 9와 동일한 조건하에서 즉 변압기의 자속 포화현상이 발생하지 않는 정상상태의 운전조건에서의 변압기 1, 2차 전류 및 여자전류 파형을 보이고 있으며 이때의 여자전류의 첨두치는 0.3[A]미만으로 나타나고 있다.

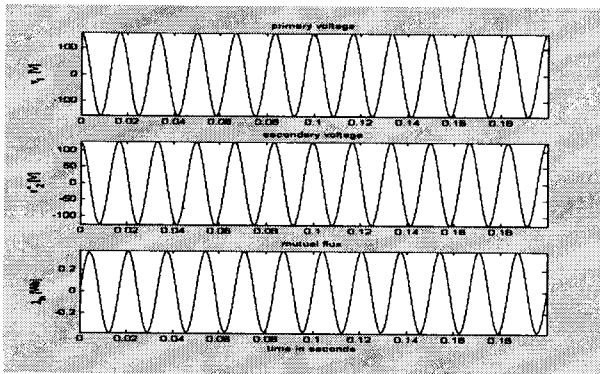


그림 9 변압기 자속포화 없는 경우의 전압과 자속
Fig. 9 Voltage and flux of transformer at the normal state. (without saturation Mode)

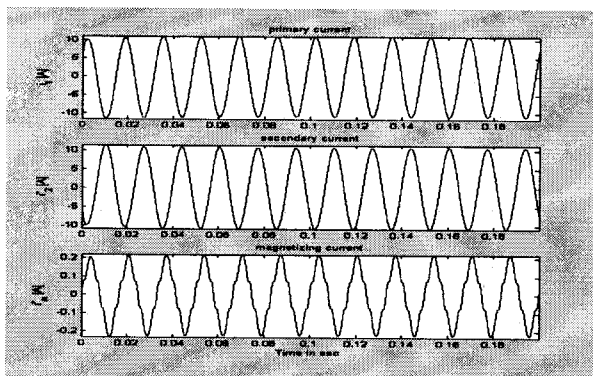


그림 10 변압기 자속포화 없는 경우의 권선전류와 여자전류
Fig. 10 Winding current and exciting current of transformer at the normal state. (without saturation Mode)

그림 11은 자속포화가 있는 경우 무부하시 변압기에 정격전압을 인가하는 경우 변압기의 입출력 전압과 자속을 모의 실험한 것이다. 변압기의 잔류 자속이 영(zero)인 경우 변압기의 자속이 정격의 약 2배로 포화되고 있으며, 변압기의 자속이 심하게 포화된 초기 상태에서는 변압기의 2차 출력 전압도 왜곡되고 있음을 볼 수 있다.

또한 그림 12는 무부하시 자속포화가 있는 경우 변압기에 정격전압을 인가하는 경우 변압기의 입출력 전류와 여자전류를 모의 실험한 결과이다. 변압기의 철손성분을 무시한다면 여자전류는 자화전류로 간주할 수 있으며, 이의 경우 변압기 자속이 포함되어 있는 경우 여자전류의 첨두치가 약 10[A] 이상의 값으로 상승하고 있는 것을 볼 수 있으며 이 상태가 무부하시의 변압기의 돌입전류가 발생한 경우이다. 그림 10과 비교하여 볼 때 약 30배 이상 커졌을 뿐만 아니라 그 첨두치가 정격부하전류보다도 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 포화 현상이 심한 경우에는 변압기의 입출력 전압에 위상차가 생기며 전류의 경우는 입출력 전류의 위상차가 모두 변압기의 여자전류로 소비되어 변압기의 성능을 저하시키는 원인이 될 수 있다.

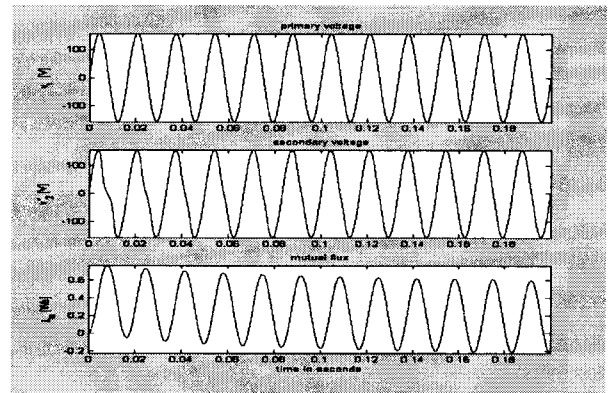


그림 11 무부하/자속포화시 변압기의 전압과 자속
Fig. 11 Voltage and flux of transformer at the no-load condition. (with saturation Mode)

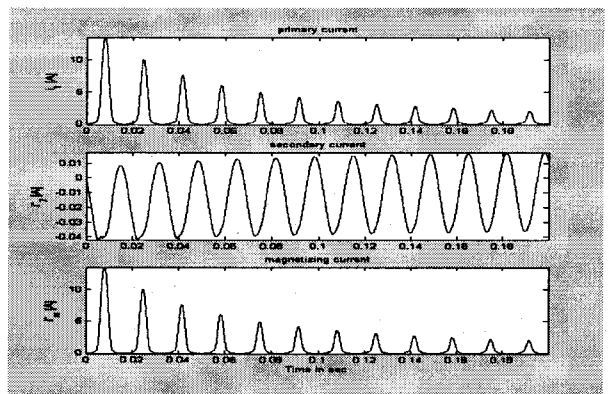


그림 12 무부하/자속포화시 변압기 전류와 여자전류
Fig. 12 Winding current and exciting current of transformer at the no-load condition. (with saturation Mode)

그림 13, 그림 14는 자속포화시에 부하가 있는 경우 변압기의 입출력 전압과 자속, 변압기의 입출력 전류와 여자전류를 각각 모의실험한 결과이다. 변압기의 입출력 전압은 심하게 왜곡되지는 않지만 자속의 포화현상은 무부하 조건과 별 차이는 없다. 그러나 변압기의 입출력 전류는 무부하 조건에서의 돌입전류와 유사한 왜곡이 발생하며 여자전류 역시 정격 여자전류에 비하여 상당히 큰 값을 보인다. 변압기에 부하가 연결되어 있는 경우에도 자속의 포화현상이 발생하면 여자전류가 심하게 왜곡됨을 알 수 있다. 그림 12의 돌입전류에 비하면 그 크기가 작다고 볼 수 있으나 그림 10의 정상상태에서의 여자전류에 비하면 여전히 10배 정도의 큰 차이가 난다고 볼 수 있다.

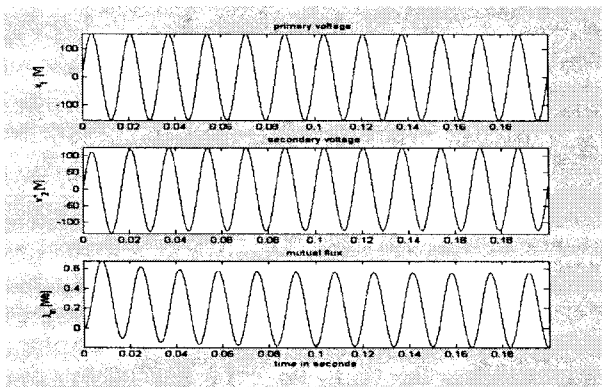


그림 13 부하조건/자속포화시 변압기의 전압과 자속
Fig. 13 Voltage and flux of transformer at the load condition. (with saturation Mode)

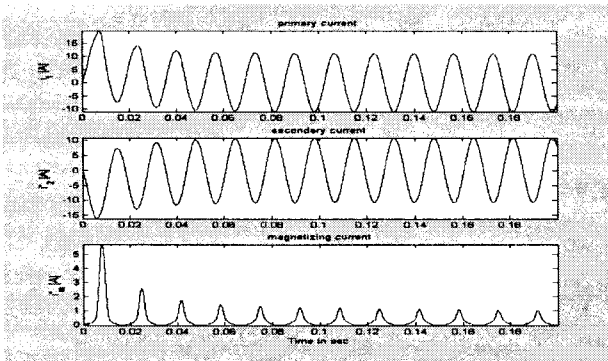


그림 14 부하조건/자속포화시 변압기의 전류와 여자전류
Fig. 14 Winding current and exciting current of transformer at the load condition. (with saturation Mode)

4. DVR에서의 동작특성과 실험결과

그림 15는 본 논문에서처럼 DVR에서의 매칭변압기 과도 특성을 고찰하기 위한 모의실험 및 실험장치의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 기본적으로 회로 구성은 전원 및 선로 임피던스, 민감부하 등으로 구성되어 있으며, 모의 지락사고에 의한 전압사그 발생 제어신호가 추가되어 있다. 지락사고 모의를 위해서 양방향 반도체 교류스위치를 사용하였으며, 이때 지락사고의 모의는 선로임피던스와 민감부하로 구성되어 있는 회로에서 부하와 병렬로 연결되어 있는

GND Faults 스위치가 지락사고 저항과 연결되면 부하의 전압이 하강하게 된다. 이러한 지락사고 모의 저항을 임의의 시간 동안에 연결하거나 차단하기 위한 제어는 'voltage Sag Control' 보드의 신호를 이용한다. 지락사고를 발생시키는 교류 스위치와 매칭 변압기를 연결하는 교류스위치는 서로 상보적 관계를 갖도록 제어하며 'DVR System'에서의 모든 로직은 그림 1에서 나타낸 것과 같은 전력회로로 구성되도록 하였다.

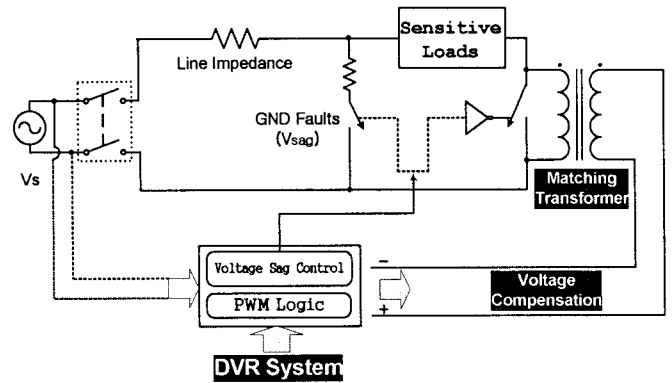


그림 15 DVR의 모의 및 실험장치의 구성도
Fig. 15 Configuration of DVR system for simulation and experiments.

그림 16, 그림 17은 그림 15와 같이 구성된 DVR시스템을 PSIM 프로그램 툴과 Matlab 프로그램을 이용하여 변압기 자속의 포화현상이 있는 경우의 DVR 출력의 특성과형을 모의한 결과이다. 그림 16은 변압기 자속의 포화현상시 전압의 Sag현상을 모의하고 이 순간 DVR 보상전압을 인버터 및 정합변압기를 통하여 전압이 보상, 주입되는 경우의 파형이다. 이의 그림 16에서는 각각 순간전압강하 파형(상단 좌), DVR인버터의 보상전압 주입파형(상단 우), DVR 보상 후 민감부하의 전압(하단 좌), 정합변압기 입력단 LC 필터 전류(하단 우)를 각각 나타낸 것이다. 이 경우는 민감부하에 전압 Sag가 잘 보상되고 있는 것으로 보이지만 그림 17의 파형은 그렇지 않다.

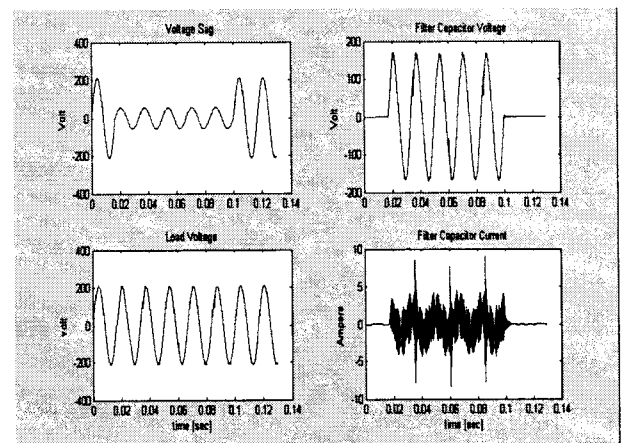


그림 16 DVR의 모의 동작파형 (전압 sag 및 보상전압, 민감 부하전압 및 필터전류)
Fig. 16 The operation characteristic of DVR.(Voltage sag and compensation, Loads Voltage and Filter current)

그림 17에서는 변압기의 내부 자속(상단 좌), 변압기 권선전류(상단 우), 변압기 자화전류(하단 좌), 변압기 여자 전류(하단 우)를 나타낸 것이다. 변압기의 권선전류 및 자화전류, 여자전류에서 DVR 초기 투입시 정격의 수 (십)배에 해당하는 매우 큰 돌입성 전류가 그림 12, 그림14와 마찬가지로 나타나게 됨을 알 수 있으며, 이에 대한 돌입전류의 제한조치가 있어야 할 것으로 판단된다.

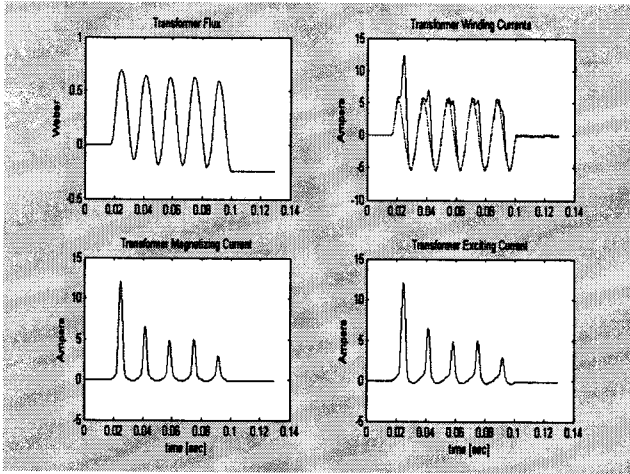


그림 17 DVR동작시 변압기의 특성파형

Fig. 17 The characteristic waveform of transformer at DVR operation. (flux/winding of transformer, magnetizing/exciting current)

그림 18은 DVR에서의 매칭변압기 과도특성에 대한 실험 파형을 나타낸 것으로 모의 지락사고에 의한 전압새그 발생과 전압보상지령 및 응답 전압/전류 파형을 각각 나타낸 것이다. 그림파형의 순서는 매칭변압기의 돌입전류에 의한 보상전압의 스파이크 현상 및 GND Faults 스위치, 보상지령 전압 및 보상순간의 돌입전류를 각각 나타낸 것이다.

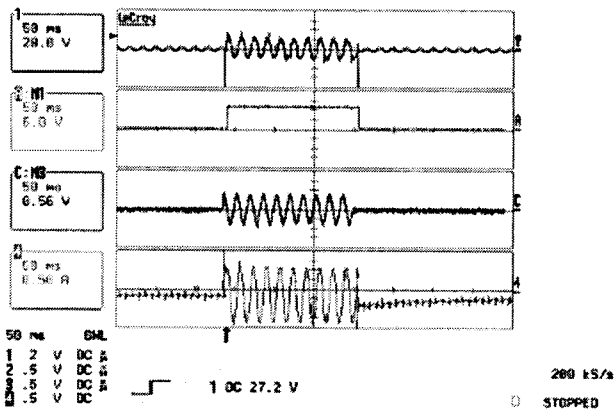


그림 18 DVR의 전압새그 발생과 보상시 전압/전류 파형
Fig. 18 The operation characteristic and voltage sag of DVR.

그림 19는 그림 15의 실험장치 구성과 동일한 조건으로 모의 지락사고의 전압새그 발생시 제어스위치(GND Faults)의 연동에 따른 DVR시스템의 동작파형을 나타낸 것이다.

이는 순서적으로 전압새그의 발생에 따른 보상된 민감부하의 정상적인 전압파형, 전압새그 발생과정, 보상순간에 따른 DVR인버터의 과도한 돌입전류의 발생 및 보상전압 지령신호를 각각 나타낸 것으로 보상 초기에 상당한 스파이크 전압 및 돌입전류가 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 마찬가지로의 조건에서 그림 20에서는 DVR을 초기 투입하는 순간 보상전압의 스파이크 및 변압기의 입력측 필터커패시터의 초기 돌입전류를 각각 나타낸 것으로 시뮬레이션 결과와 유사한 현상이 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

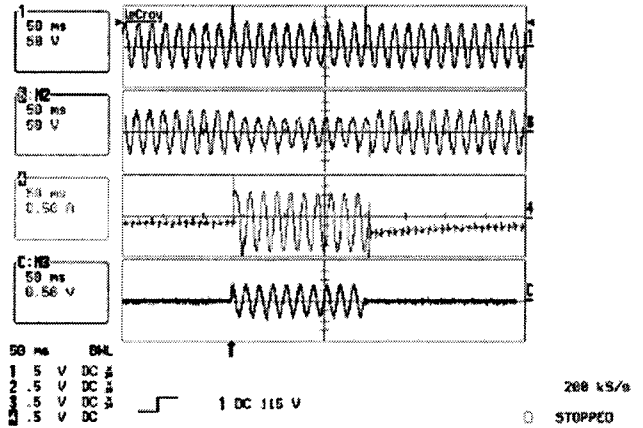


그림 19 DVR의 동작시 전압/전류 파형

Fig. 19 The operation characteristic of DVR.(Loads and sag Voltage, Compensated current and voltage reference)

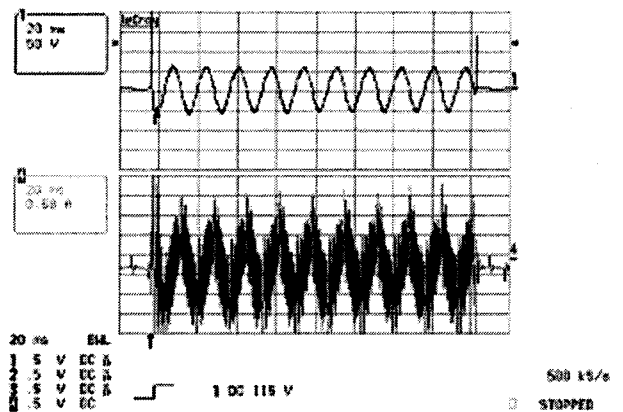


그림 20 DVR의 보상전압과 커패시터 필터전류
Fig. 20 The compensated vol. and capacitor current of DVR.

5. 결 론

배전계통에서의 순시적 전압강하(Voltage Sag)를 보상하는 직렬전압보상형태의 동적전압보상기(DVR)는 PWM인버터, LC필터, 매칭변압기 등으로 구성된다. 이때의 매칭변압기는 전기적 절연 및 주변 제어시스템과의 전압매칭, 원활한 계통연계 등을 위하여 사용된다. 그러나 다이내믹한 전압주입을 위한 이러한 매칭 변압기의 사용은 철심 내부의 자

속 포화 현상 때문에 과도한 돌입전류 및 정격의 수 배에 달하는 변압기 용량선정 등의 문제가 수반된다.

따라서 본 논문에서는 DVR용 매칭변압기의 자속 포화 현상에 따른 여러 문제점 및 특성해석을 수행하였으며, 해석 결과의 타당성을 확인하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 변압기의 자속포화 현상에 따른 문제점을 해석하기 위하여 새로운 등가 모델링 기법을 도입하여 자속 및 전류특성을 고찰하였다. 변압기가 포화되었을 경우에는 정상상태의 운전에 비하여 무부하 및 부하상태에서 모두 전압과 전류 출력을 왜곡을 발생하였으며, 특히 변압기의 여자전류 등에서는 정격 전류보다 수 십 배에 달하는 돌입성 전류가 나타나고 있음을 확인하였으며 이는 변압기의 열화현상 가속 및 절연과피 등의 주요 원인이 됨을 알 수 있었다.

DVR의 시뮬레이션 및 실험에서는 전압새그의 발생을 위하여 지락사고를 모의한 GND Faults 스위치를 사용하여 실험하였으며, 부족 전압에 해당하는 전압을 다이내믹하게 민감감부하에 보상하여 주었으나 이의 특성 역시 과도한 돌입전류가 발생함을 알 수 있었다. 따라서 이의 특성은 시스템의 제어특성 악화까지도 일으킬 수 있으므로 이의 돌입전류를 제한할 수 있는 별도의 제어장치 추가도입이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] D. Mahinda Vilathgamuwa et al, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans., POWER DELIVERY, Vol.18, NO.3, pp.928-936, July 2003.
- [2] P.B.Steciuk and J.R.Redmon, "Voltage sag analysis peaks customer service", IEEE Computer Applications in Power, Vol.9, No.4, pp.48-51, October 1996.
- [3] D. Mahinda Vilathgamuwa, H. M. Wijekoon, "Control and Analysis of a New Dynamic Voltage Resotrer Circuit Topology for Mitigating Long Duration Voltage Sags," Industry Applications Conference, 2002, 37th ISA Annual Meeting. Conference Record of the , Volume: 2, 13-18 Oct. 2002, pp.1105~1112.
- [4] Eric John, "Experience with a Static Series Compensation Device(DVR) at a Semiconductor Facility", ABB Power T&D Company Inc., April 1999.
- [5] 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 System, vol. 87, No. 3, 1968, pp.665~669.
- [6] 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.
- [7] Prusty, S. and Rao, M. V. S., "A Direct Piecewise Linearized Approach to Convert RMS Saturation Characteristic to Instantaneous Saturation Curve," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.16, No.1, 1980, pp. 156~160

- [8] Fitzer, C., Arulampalam, A., Barnes, M., Zurowski, R., "Mitigation of saturation in dynamic voltage restorer connection transformers," Power Electronics, IEEE Trans. Vol. 17 , No.6 , pp. 1058~1066, Nov. 2002
- [9] Math H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems - Voltage Sags and Interruptions, IEEE Press The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, New York, 2000.

저 자 소 개



손진근 (孫珍勛)

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



김동준 (金東俊)

1990년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994~1999 고등기술연구원 주임연구원 2002~현재 컴파이언컨설팅 에너지 컨설턴트 2008~현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정



강민구 (康珉九)

1985년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1987년 KAIST 전기전자공학과 졸업(석사). 2002. 3~현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 경기공업대학 부교수.



전희종 (田喜鍾)

1975년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1977년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1977~1981 공군사관학교 전자공학과 교수, 1987년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년~1996년 Univ. of Victoria CA. 객원교수. 2008~현재 숭실대학교 공과대학장, 1983년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수