동적전압보상기를 구성하기 위한 정합변압기의 자속포화현상 모델링

김왕래*, 강호현*, 전희종*, 한운동**, 오중민***
숭실대학교*, 충주대학교**, 김천대학***

Flux Saturation Modeling of Matching Transformer for Dynamic Voltage Restore

Wang-Rae Kim*, Ho-Hyun Kang*, Hee-Jong Jeon*, Woon-Dong Han**, Joong-Min Oh***
Soong-Sil Univ.*, Choong-Ju Nat'l Univ.**, Gim-Cheon College***

ABSTRACT

Matching transformer in Dynamic Voltage Compensator is needed for grid connection and isolation. Flux saturation in transformer will be occurred by voltage of transformer from inverter and DC offset voltage and flux saturation makes over current in transformer. In this paper, mathematical modeling of matching transformer is proposed for flux saturation simulation of Dynamic Voltage Compensator.

1. 서 론

전원계통에 순간적인 전압 강하나 전압상승이 발생하였을 때 전원전압의 고장을 순시적으로 보상하여 부하측 전압을 안정하게 유지하여 주는 전력품질제어기로 동적전압보상기의 역할은 매우 중요하여 많은 연구가 진행되고 있다.[1-2]

순시적 전압강하의 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 Restore)의 명칭이 통용되고 있는 실정이다.[3]

동적전압보상기의 구성 중에서 배전 계통과 전기적 절연을 유지하면서도 계통과 연계하기 위한 전압 주입용 정합변압기는 많은 문제점을 갖고 있는 구성요소이다. 인버터에서 발생된 임의의 전압을 정합변압기를 통하여 주입하는 과정에서 철심 내부의 자속이 포화되어 정격전류 이상의 과도한 전류가 흐를 수 있는 문제가 있기 때문이다. 따라서 변압기의 포화문제는 민감부하에 원하는 전압을 공급하기 위해서 뿐만 아니라 전원공급장치로 사용하는 인버터 시스템의 보호를 위해서도 반드시 해결해야할 문제이기도 하다.

이를 위하여 본 논문에서는 동적전압보상기의 변압기의 포화현상을 모의실험 할 수 있도록 수학적 모델링을 기법을 제시하고 모의실험을 통해 정합변압기의 문제점을 검토하도록 한다[4]

2. 변압기 포화 현상 모델링

2.1 선형 동작 영역에서의 모델링

동적전압보상기는 그림 1과 같이 구성되어 보상전압을 변압기를 통하여 계통에 직렬 주입하는 시스템이다. 동적전압보상기에서 변압기는 민감 부하의 보호 및 절연 등의 목적을 위해서 필요한 중요한 구성요소이다. 그러나 이러한 변압기의 사용은 인버터로부터 인가되는 스위칭 전압 및 직류전압의 DC-offset 여부에 따라 변압기 내부의 자속에 포화 현상이 발생한다. 이 때문에 변압기 내부에는 돌입전류 및 과전류가 흘러서 시스템을 파괴하고 특히 인버터 출력전압에는 과도한 스파이크 전압이 인가되어 변압기 절연을 파괴한다.

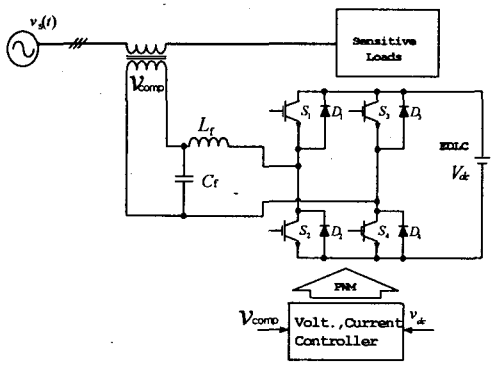


그림 1 동적전압보상기의 회로구성
Fig. 1 Circuit with DVR systems

따라서 본 논문에서는 변압기의 포화현상에 따른 돌입전류의 크기 변화를 모의실험 할 수 있도록 수학적 모델링을 수행한다. 변압기는 단상2권선 변압기로 설정하며, 등가회로 모델은 그림 2와 같다.

그림 2의 등가회로로부터 변압기 1, 2차 측의 전압방정식을 구하면 식 (1), (2)와 같다. 여기서 변압기 1, 2차 측의 전류 및 자속은 각각 i_1, i_2 및 λ_1, λ_2이고, 저항은 r_1, r_2이다. 변압기 2차 측의 전압 및 자속, 전류 등은 1차 측에 대하여 환산하여 표현한다.

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

$$v_2 = i_2' r_2 + \frac{d\lambda_2'}{dt}[V] \quad (2)$$

또한 변압기의 자속은 쇄교 자속과 1, 2차 측 누설 인덕턴스 (L_{i1}, L_{i2}') 및 상호인덕턴스 (L_m) 등으로 표현할 수 있다. 변압기의 1차 측에 대하여 1, 2차 측의 자속 및 전류 그리고

상호 쇄교 자속(λ_m)을 구하면 식 (3)에서 (5)까지와 같다

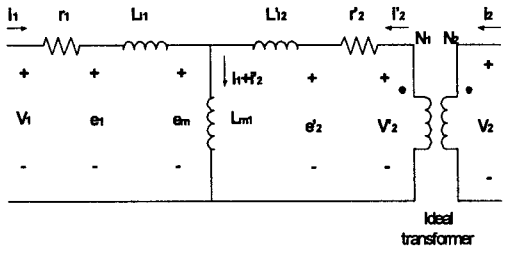


그림 2 변압기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of transformer

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + \lambda_m [Wb] \tag{3}$$

$$\lambda_2' = L_{l2}' i_2' + \lambda_m [Wb] \tag{4}$$

$$\lambda_m = L_m (i_1 + i_2') [Wb] \tag{5}$$

이러한 관계식으로부터 상호 쇄교 자속 λ_m을 다시 구할 수 있다. 즉 식 (3)과 식(4)에서 i_1과 i_2'을 구하면 식 (6), (7)과 같고, 이를 식 (5)에 대입하면 식 (8)이 된다.

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

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

$$\lambda_m = L_M \left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L_{l2}'} \right) [Wb], \quad \frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_m} + \frac{1}{L_{l1}} + \frac{1}{L_{l2}} \tag{8}$$

또한 식 (1), (2), (6), (7)으로부터 λ_1, λ_2'을 다시 구하면 다음 식 (9), (10)과 같다.

$$\lambda_1 = \int v_1 - \frac{\lambda_1 - \lambda_m}{L_{l1}} r_1 \, dt \; [Wb] \tag{9}$$

$$\lambda_2' = \int v_2^1 - \frac{\lambda_2' - \lambda_m}{L_{l2}'} r_2 \, dt \; [Wb] \tag{10}$$

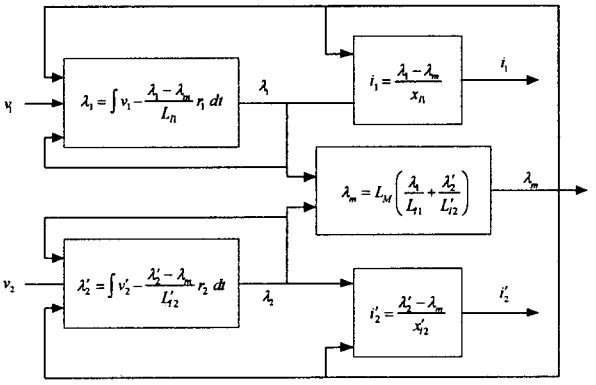


그림 3 변압기의 파라미터 모델링(선형영역 모드)
Fig. 3 Parameter modeling of transformer(Linear Operation Mode)

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 블록 다이어그램으로 통합하여 나타내면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 그러나 이 모델은 변압기의 자속이 포화되었을 때의 파라미터를 포함하지 않고 있다. 따라서 변압기의 자속이 포화되었을 때의 비선형 동작영역에서의 파라미터를 포함시켜야 한다.[4]

2.2 비선형 동작 영역에서의 모델링

변압기 철심의 포화현상은 기본적으로 변압기의 상호 인덕턴스 때문에 발생한다. 변압기 철심의 포화 현상에서 변압기 권선의 누설 인덕턴스는 그 영향은 작지만 해석이 복잡하여 일반적으로 무시한다. 변압기 철심의 포화 현상은 그림 4와 같이 변압기 개방 시험으로부터 얻은 곡선을 이용하여 모델링하고 모의실험 할 수 있다. 변압기의 철손을 무시한다면 무부하시 변압기 1차 측 권선에 흐르는 전류는 자화 전류 로 간주할 수 있다. 자화 전류 $I_{m.s}$는 변압기의 1차권선 임피던스 $r_1 + j\omega L_{l1}$에서 전압강하를 일으키지만 자화 임피던스 $x_{m1} = \omega L_{m1}$이 매우 크므로 자화 임피던스의 양단에 발생하는 1차권선 임피던스의 전압강하보다 매우 크다. 따라서 1차 권선 임피던스의 전압강하는 무시한다. 또한 변압기 개방 시험 조건에서는 변압기의 2차 권선전류가 흐르지 않으므로 이러한 조건들 하에서는 $V_{1.s} \approx I_{m.s} x_{m1}$이라 놓을 수 있다. 변압기가 포화되지 않은 동작 영역에서는 $V_{1.s}/I_m$의 비율은 점점 작아진다.

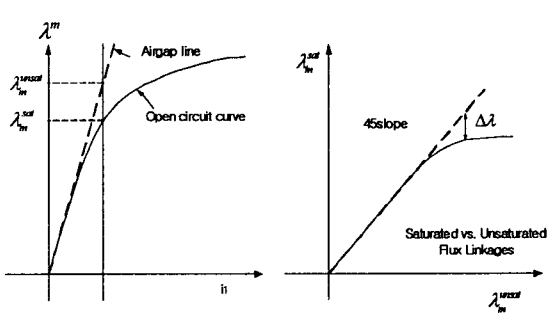


그림 4 변압기의 포화 특성곡선
Fig. 4 Saturation curve of transformer

변압기 모델에 철심의 포화 현상을 포함시켜 모의실험을 하려면 상호리액턴스의 값을 매 계산시마다 변경하는 방법, 포화된 쇄교 자속을 해석적 함수를 이용하여 자화 전류를 근사화하는 방법, 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하는 방법 등을 생각할 수 있다. 본 논문에서는 상호 쇄교 자속 값이 포화 되었을 때와 포화되지 않았을 때의 값의 관계를 이용하는 방법을 이용하였다.

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 자화 전류의 비선형성을 포함 시키는 방법이 필요하다. 식 (5)를 쇄교 자속이 포화된 경우와 포화되지 않은 경우로 나누어 생각해 본다면 포화되지 않은 쇄교 자속의 식은 식 (5)를

그대로 이용하여 식 (11)과 같이 표현 할 수 있다.

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

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

$$i_1 = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_{l1}} \; [A] \tag{12}$$

$$i_2 = \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_{l2}'} \; [A] \tag{13}$$

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

$$\frac{\lambda_m^{unsat}}{L_{m1}^{unsat}} = \frac{\lambda_1 - \lambda_m^{sat}}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2' - \lambda_m^{sat}}{L_{l2}'} \tag{14}$$

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 얻는다.

$$\lambda_m^{sat} = L_M\left(\frac{\lambda_1}{L_{l1}} + \frac{\lambda_2'}{L_{l2}'} - \frac{\Delta\lambda}{L_{m1}^{unsat}}\right) [Wb] \tag{15}$$

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

$$\frac{1}{L_M} = \frac{1}{L_{m1}^{unsat}} + \frac{1}{L_{l1}} + \frac{1}{L_{l2}'} \tag{16}$$

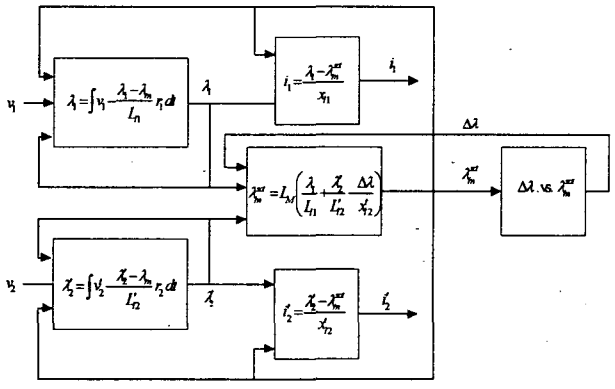


그림 5 변압기의 파라미터 모델링(포화현상 포함)
Fig. 5 Parameter modeling of transformer(with saturation Mode)

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_M과 L_{m1}^{unsat}이 상수라는 점이다. 이렇게 변압기 철심 내부의 자속이 포화되는 경우를 포함하여 변압기를 모델링 하면 그림 5와 같고 그림 3과 비교해 볼 때 λ_m^{sat}로부터 $\Delta\lambda$를 계산해 내어야 한다. 디지털 모의실험에서는 조견표를 사용하면 된다.

3. 자속포화현상의 시뮬레이션 및 결과 고찰

변압기의 과여자 전류의 문제는 크게 변압기 2차 측이 개방되어 있는 경우에 큰 돌입 전류가 흐르는 현상과 변압기 1차 측에 인가되는 전압이 DC-offset을 가지는 경우에 과도한 여자 전류가 발생하는 문제로 생각할 수 있다.

그림 6은 무부하시 변압기에 정격전압을 인가하는 경우 변압기의 입출력 전압과 자속을 모의실험 한 것이다. 변압기의 잔류 자속이 영(zero)인 경우 변압기의 자속이 정격의 2배로 포화되는 모습을 볼 수 있다. 변압기의 자속이 심하게 포화된 초기 상태에서는 변압기의 2차 출력 전압도 왜곡되고 있음을 볼 수 있다.

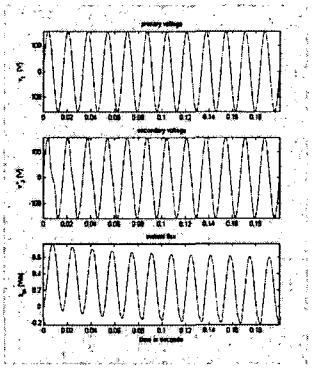


그림 6 무부하시 변압기의 전압과 자속
Fig 6 Transformer voltage and flux, no-load condition

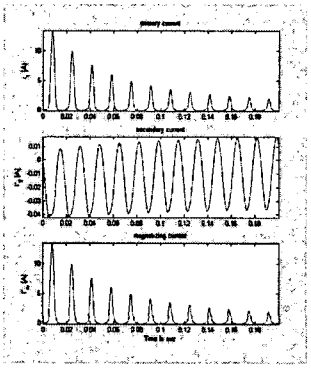


그림 7 무부하시 변압기 권선전류 와 여자전류
Fig 7 Transformer winding current and exciting current, no-load condition

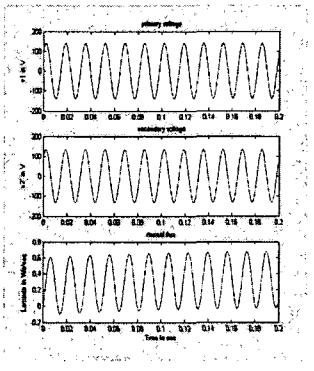


그림 8 인버터 주입 전압에 정격의 1% DC-offset이 있는 경우 전압, 자속
Fig 8 Transformer voltage and flux with 1% input voltage DC-offset

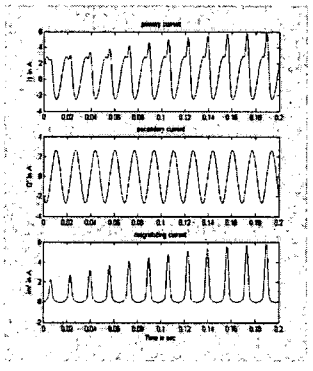
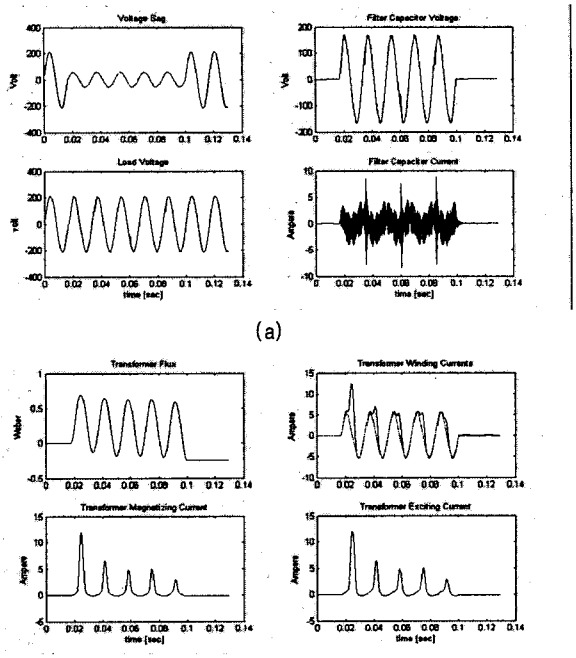


그림 9 인버터 주입 전압에 정격의 1% DC-offset이 있는 경우 전류 파형
Fig 9 Transformer currents with 1% input voltage DC-offset

그림 8은 인버터 주입 전압에 정격의 1%에 해당하는 DC-offset이 존재하는 경우 변압기의 입출력 전압, 자속 파형이다. 그림 9는 1%의 DC-offset이 있을 때 변압기 입출력 전류 파형이다. 1%의 DC-offset이 있을 때 입출력 전압, 자속 파형은 크게 문제가 있어 보이지 않지만 그림 9의 전류의 파형은

여자 전류가 상당히 큰 값으로 증가하고 있다. 인버터 주입 전압에 포함된 DC-offset이 변압기 자속의 포화를 가중시키고 있기 때문이다. 변압기의 여자전류의 증가는 결국 변압기의 권선에 흐르는 전류를 심각하게 왜곡 시키고 있다.



(a)

(b)

그림 10 동적전압보상기 동작 시뮬레이션

Fig. 10 Simulation waveform of Dynamic Voltage Compensator

그림 10은 동적전압보상기의 보상전압을 주입하는 경우의 파형이다. (a)에는 순간전압강하 파형, 보상전압주입 파형, 부하전압, 필터 전류를 보인다. 이 경우 전체적으로 전압보상이 잘 되고 있는 것으로 보인다. (b)에는 변압기 내부자속, 변압기 권선전류, 변압기 자화전류, 변압기 여자전류를 보인다. 변압기의 자화전류와 여자전류의 차이는 철손이 기인한다. (b)의 경우 변압기의 내부 자속이 정격의 2배까지 포화되고 있음을 알 수 있다. 이렇게 변압기의 자속이 포화 될 때에 변압기의 여자 전류와 자화 전류는 정격의 수십 배에 달하는 첨두치를 보이며 그 영향으로 인하여 변압기 1차 권선에서는 변압기의 무부하 여자 실험에서나 볼 수 있는 심각한 돌입 전류가 발생 한다. 또한 그 돌입 전류는 몇 주기가 지나도 쉽게 없어지지 않는 것을 볼 수 있다.

자속포화현상을 모델링하여 모의실험을 수행한 결과 모델링은 자속포화현상에 의한 변압기의 문제점을 잘 보여주고 있다. 이러한 문제점은 동적전압보상기의 구성요소인 정합변압기로 사용될 때 출력전압의 왜곡은 물론 부하 전류에 왜곡을 발생시킬 수 있으며 정합변압기의 절연파괴 등의 문제로 나타날 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 배전계통의 순간전압강하를 보상하는 동적전압보상기의 정합변압기의 자속 포화 현상을 모델링 하였다. 계통연계형의 직렬 전압 주입 인버터 시스템에서의 변압기는 포화현상에 의하여 출력전압의 왜곡은 물론 부하 전류에 왜곡을 발생 시킬 수 있으며 변압기 자체로 보아서도 과도한 여자전류가 변압기의 열화를 가속화 하는 원인이 될 수도 있다.

따라서 이러한 현상을 모의실험을 수행할 수 있도록 변압기 포화 현상의 수학적 모델링 기법을 제안하고 모의실험을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 모델링 기법은 동적전압보상기의 정합변압기 돌입전류 문제를 해결하기 위한 제어기의 설계와 설계된 제어기의 성능 실험에 도움이 될 것이라 사료된다.

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

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.1 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] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] M. J. Ryan, W. E. Brumsickle and R. D. Lorenz, "Control Topology Options for Single-Phase UPS Inverters," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, March/April 1997, pp.493~501.