전력전자학술대회 논문집 2001. 7. 4 ~ 7. 7

3상 다이오드 정류기의 Simulink 모델

이 진 우
두원공과대학 자동화시스템과, jinwoo@doowon.ac.kr

Simulink Model of 3-Phase Diode Rectifiers

Jin-Woo Lee
Dept. of Automation Systems, Doowon Technical College, jinwoo@doowon.ac.kr

ABSTRACT

Most of inverters adopt a diode rectifier as an input stage, which has very simple and rugged structure and therefore low cost. In order to properly design the 3-phase diode rectifier with an output smoothing capacitor and input inductors, it is necessary to fully simulate the system due to its nonlinear characteristics. Therefore this paper describes the operating behaviors including the current commutation in detail by using the proposed equivalent circuit, and also proposes the Simulink-based model of the system. The simulation results show the validity of the proposed model in all operating conditions.

1. 서 론

3상 다이오드 정류기는 구조가 간단하고 저가이기 때문에 다양한 전력변환장치에 널리 적용되고 있으며, 상용 인버터 제품의 입력부는 대체로 다이오드 정류기로 구성되어 있다.

인버터의 입력부로 사용되는 3상 다이오드 정류기는 출력측에 직류 평활용 전해 콘덴서를 사용하고 있으며, 전원측에는 역률을 개선하고 전해 콘덴서의 리플전류용량을 저감하거나 또는 리플전류를 감소하여 콘덴서의 발열량을 저감하기 위하여 인덕터를 일반적으로 사용하고 있다.

이러한 3상 다이오드 정류기를 설계하기 위해서는 적절한 모델링 및 시뮬레이션을 수행해야 하는데, 기존의 PSIM과 같은 전용 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 할 수 있으나, 보다 범용성을 갖추고 있으며 최근 공학용으로 널리 사용되는 Matlab/Simulink를 사용한 모델링과 해석 및 설계를 수행하는 것이 요청되고 있다[1, 2, 4]. 또한, 트랜지스터와 같은 제어소자에 비해 비제어소자인 다이오드로 구성된 3상 정류회로 모델링은 거의 다루어지지 않고 있다. 그러므로 범용성을 갖는 Matlab/Simulink를 이용한 3상 다이오드 정류회로의 적절한 모델이 제시된다면 활용성이 높고, 아울러 부가적인 기능을 쉽게 구현할 수 있는 장점을 가질 것이다.

본 논문에서는 먼저 3상 다이오드 정류기의 해석을 위한 등가회로를 제시하고, 등가회로를 이용하여 동작조건에 따른 회로방정식 유도 및 동작특성을 자세히 분석하며, Simulnk를 이용한 모델을 제안하고 시뮬레이션을 통하여 제안한 방법의 유효성을 보이고자 한다.

2. 3상 다이오드 정류기의 해석

3상 다이오드 정류기의 회로는 그림 1과 같으며, 여기서 L은 전원측 인덕터이고 C는 출력측 직류 평활용 전해 콘덴서를 나타낸 것이다.

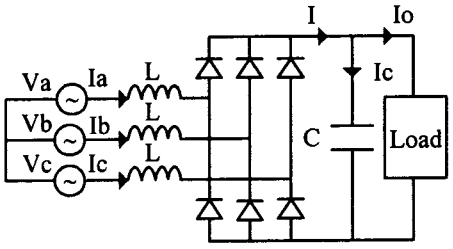


그림 1 3상 다이오드 정류회로
Fig. 1 3-phase diode rectifier

그림 1과 같이 전원측에 인덕터가 있는 경우에 전류중복(commutation overlap)구간이 발생할 수 있다[3]. 전류중복은 3상 다이오드 정류기의 회로구조상 상부 또는 하부의 상간, 즉 상부의 2개 다이오드 또는 하부의 2개 다이오드 사이에서만 발생하며, 상하부에서 동시에 전류중복이 발생하지 않는

다. 이것은 각 상의 다이오드가 직류전압에 의해 역방향 바이어스 되어 있으므로 한 상에 있는 두 개의 다이오드가 동시에 도통될 수 없기 때문이다. 따라서 3상 다이오드 정류기는 상하부 각각 2개 다이오드 및 전원을 포함하는 그림 2의 등가 정류회로로 나타낼 수 있다. 그림 2에서 각 상의 인덕터와 다이오드는 모두 직렬 연결되어 있고, 따라서 인덕터 전류는 그림 2에 나타낸 전류방향을 고려하면 항상 영보다 크거나 같게 된다. 그리고, 다이오드는 바이어스 전압에 따라서 도통 및 개방상태가 결정되는 특징을 갖고 있다. 이러한 회로의 특성과 전류 중복을 기준으로 그림 2의 등가회로를 이용하여 3상 다이오드 정류기의 해석을 다음과 같이 3가지 동작모드로 나누어 할 수 있다.

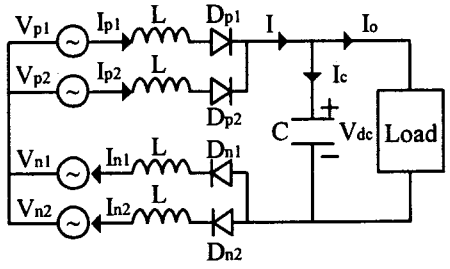


그림 2 3상 다이오드 정류기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of a 3-phase diode rectifier

동작모드 1

먼저 전류중복이 아닌 동작모드로서, 그림 2의 등가회로에서 상하부의 다이오드(D_{p1}, D_{n1})가 각각 하나씩 순방향 바이어스로 도통상태이거나, 역방향 바이어스로 모두 개방상태인 동작모드이며, 이에 대한 인덕터의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$L\frac{di}{dt} = \frac{1}{2}\left(V_{p1} - V_{n1} - V_{dc}\right) \qquad (1)$$

여기서 V_{p1}은 그림 1의 3상 전압중 최대 상전압이고, V_{n1}은 최소 상전압이다. 또한 V_{dc}는 직류전압이고, 정류기의 출력전류 i 는 인덕터의 전류 i_{p1} 및 i_{n1} 과 같다.

그림 2와 식 (1)에서 인덕터 전류가 흐르지 않는 상태에서 인덕터 전압이 영보다 작으면 역방향 바이어스로 다이오드는 개방상태를 계속 유지한다. 반면에, 인덕터 전압이 영보다 커지면 다이오드가 도통되고 식 (1)에 의한 인덕터 전류가 흐르게 되며, 또한 인덕터에 양의 전류가 흐를 때 동작모드 1이 시작되어도 식 (1)에 의한 인덕터 전류가 흐르게 된다. 이와 같이 전류가 흐르는 경우는 전류중복으로 전이되는 전류가 연속인 경우와 동작모드 1을 반복하는 전류가 불연속인 경우의 2가지 상태를 가진다. 그러므로 식(1)의 인덕터 전압과 전류를 검사하면 인덕터와 직렬 연결된 다이오드의 도통 또는 개방 상태에 따른 회로의 동작을 위와 같이 해석할 수 있다. 한편, 동작모드 1에서 인덕터의 초기 전류는 영이거나 주어진 일정 전류이다.

동작모드 2

상부의 상간에 전류중복이 발생하는 동작모드로서, 전류중복은 동작모드 1에서 전류가 흐르고 있을 때, 그림 2에서 식 (2)의 조건이 성립하면 시작되며, V_{p2}와 연결되어 전류가 흐르지 않던 다이오드(D_{p2})가 순방향 바이어스 되어 도통된다.

$$V_{p1} - L\frac{di_{p1}}{dt} \le V_{p2} \qquad (2)$$

동작모드 1에서 동작모드 2로 전이되므로 식 (2)의 인덕터 전압에 식 (1)을 대입하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$-V_{p1} - V_{n1} + 2V_{p2} - V_{dc} \ge 0 \qquad (3)$$

한편, 동작모드 2에서 인덕터의 전압방정식은 다음과 같다.

$$L\frac{di}{dt} = \frac{1}{3}\left(V_{p1} - 2V_{n1} + V_{p2} - 2V_{dc}\right) \qquad (4)$$

$$L\frac{di_{p2}}{dt} = \frac{1}{3}\left(-V_{p1} - V_{n1} + 2V_{p2} - V_{dc}\right) \qquad (5)$$

여기서 V_{p2}는 동작모드 1의 3상 전압 중에서 선택되지 않은 상전압이고, V_{p1}과 V_{n1}은 각각 동작모드 1에서 선택된 상전압이다. 그리고, 하부의 인덕터 전류 i_{n1}은 식 (4)의 정류기 출력전류와 같다. 또한, 정류기 출력전류 i 의 초기전류는 동작모드 1의 최종전류이고, 인덕터 전류 i_{p2}의 초기전류는 항상 영이다.

식 (5)의 인덕터 전압은 식 (3)의 전류중복 시작조건에 대한 전압과 비교하여 크기는 다르지만 부호가 갖기 때문에 동작모드 1에서 인덕터의 전류와 식 (5)를 점검하면 동작모드 2로 전이되는 시점을 알 수 있다. 한편, 동작모드 2에서 식 (5)의 인덕터 전압이 영보다 크게 되므로 다이오드가 순방향 바이어스 되고, 인덕터 전류 i_{p2}가 증가하게 된다. 이 때 인덕터 전류 i_{p2}가 정류기 출력전류 i 와 같아지면 전류중복 구간이 끝나고, 또한 인덕터 전

류 i_{p2}가 증가하다가 감소하여 영이 되어도 전류 중복 구간이 끝나며, 동작모드 2는 다시 동작모드 1로 전이된다. 이 경우에 식 (1)의 정류기 출력전류 i의 초기전류는 식 (4)의 최종전류가 된다.

동작모드 3

하부의 상간에 전류중복이 발생하는 동작모드로서 동작모드 2와 유사하다. 동작모드 1에서 전류가 흐르고 있을 때, 그림 2에서 식 (6)의 조건이 성립하면 전류중복이 시작되고, V_{n2}와 연결되어 전류가 흐르지 않던 다이오드(D_{n2})가 순방향 바이어스 되어 도통된다.

$$V_{n1} + L\frac{di_{n1}}{dt} \geq V_{n2} \tag{6}$$

동작모드 1에서 동작모드 3으로 전이되므로 식 (6)의 인덕터 전압에 식 (1)을 대입하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$V_{p1} + V_{n1} - 2V_{n2} - V_{dc} \geq 0 \tag{7}$$

한편, 동작모드 3에서 인덕터의 전압방정식은 다음과 같다.

$$L\frac{di}{dt} = \frac{1}{3}(2V_{p1} - V_{n1} - V_{n2} - 2V_{dc}) \tag{8}$$

$$L\frac{di_{n2}}{dt} = \frac{1}{3}(V_{p1} + V_{n1} - 2V_{n2} - V_{dc}) \tag{9}$$

여기서 V_{n2}는 동작모드 1의 3상 전압 중에서 선택되지 않은 상전압이고, V_{p1}과 V_{n1}은 각각 동작모드 1에서 선택된 상전압이다. 그리고, 상부의 인덕터 전류 i_{p1}은 식 (8)의 정류기 출력전류와 같다. 또한, 정류기 출력전류 i의 초기전류는 동작모드 1의 최종전류이고, 인덕터 전류 i_{n2}의 초기전류는 항상 영이다.

식 (9)의 인덕터 전압은 식 (7)의 전류중복 시작 조건에 대한 전압과 비교하여 크기는 다르지만 부호가 갖기 때문에 동작모드 1에서 인덕터의 전류와 식 (9)를 점검하면 동작모드 3으로 전이되는 시점을 알 수 있다. 한편, 동작모드 3에서 식 (9)의 인덕터 전압이 영보다 크게 되므로 다이오드가 순방향 바이어스 되고, 인덕터 전류 i_{n2}가 증가하게 된다. 이 때 인덕터 전류 i_{n2}가 정류기 출력전류 i와 같아지면 전류중복 구간이 끝나고, 또한 인덕터 전류 i_{n2}가 증가하다가 감소하여 영이 되어도 전류중복 구간이 끝나며, 동작모드 3은 다시 동작모드 1로 전이된다. 이 경우에 식 (1)의 정류기 출력전류 i의 초기전류는 식 (8)의 최종전류가 된다.

한편 직류 평활용 콘덴서에 대한 상태방정식은 식 (10)과 같으며, 3가지 동작모드에 모두 적용된다.

$$C\frac{dV_{dc}}{dt} = i_c = i - i_o \tag{10}$$

여기서 i_c는 콘덴서의 전류이고, i_o는 부하전류이다. 콘덴서의 초기전압은 초기충전회로 등에 의해 설정되는 전압이다.

3. 3상 다이오드 정류기의 모델링

등가회로를 이용한 3상 다이오드 정류기의 해석을 바탕으로 모델링을 위한 동작 특성을 살펴보고, 각 부분을 Simulink를 이용하여 모델링 한다.

먼저 그림 2의 등가회로와 각 동작모드 해석에서 공통으로 존재하는 인덕터와 다이오드가 직렬 연결된 회로는 그림 3과 같이 Simulink를 이용한 모델로 나타낼 수 있다. 그림 3에서 다이오드의 동작상태는 앞에서 살펴본 바와 같이 인덕터의 전압 비교(En_V)와 전류 비교(En_I)의 검사결과에 대한 논리합(OR)으로 정한다. 도통상태에서 논리합의 출력은 1이고 개방상태에서 출력은 0이다. 곱셈(Dot P)을 이용하여 다이오드의 동작상태에 따른 인덕터 전압을 구하고, 이를 적분하여 인덕터 전류를 계산한다. 그림 3에서 적분기의 초기값은 각 동작모드에서 정한 값으로 설정한다. 따라서 그림 3을 이용하면 각 동작모드의 인덕터 전압 방정식을 계산할 수 있다.

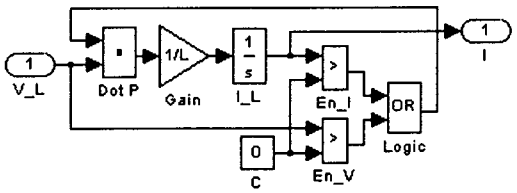


그림 3 다이오드와 인덕터 직렬회로 모델

Fig. 3 Model of the series circuit of a diode and an inductor

한편, 앞에서 살펴 본 동작모드 해석으로부터 동작모드의 가능한 변화는 다음과 같이 5가지이다. (A) 동작모드 1의 반복, (B) 동작모드 1에서 동작모드 2, 또는 동작모드 3으로 전이, (C) 동작모드 2, 또는 동작모드 3에서 동작모드 1로 전이

동작모드의 변화에 따라서 정류기 출력전류 i

는 식 (1), 식 (4), 또는 식 (8)을 이용하여 각각 계산하여야 한다. 그런데, 각 동작모드 해석에서 살펴본 바와 같이 (B)와 (C)의 경우 동작모드가 전이할 때 새로 시작하는 동작모드의 인덕터 초기전류는 이전 동작모드의 인덕터 최종전류이다. 또한, 각 식에서 인덕턴스가 같기 때문에 동작모드가 변할 때, 각 식의 우변 인덕터 전압만 전이되는 해당식의 인덕터 전압을 인가하여 계산하면 초기값 설정이 필요 없어 구현이 용이하다. 따라서 (A), (B), (C)의 동작모드 변화에 대한 3가지 동작모드의 정류기 출력전류는 그림 3의 모델 하나를 사용하여 계산할 수 있다. 다만 처음에 초기전류 값을 설정하기만 하면 된다.

한편 (B)의 동작모드 변화에 대한 전류중복구간의 인덕터 전류는 식 (5), 또는 식 (9)를 이용하여 각각 계산하여야 한다. 인덕터 전류 i_{p2} , i_{n2}의 초기전류 값은 항상 영이고, 또한 3상 다이오드 정류기에서 전류중복구간이 상하에서 동시에 발생할 수 없다. 그러므로 하나의 그림 3 모델을 사용하고, 동작모드에 따른 인덕터 전압을 인가하여 식 (5) 또는 식 (9)의 인덕터 전류를 계산할 수 있다. 다만 초기조건을 항상 영으로 설정하기 위해서 동작모드가 끝날 때 전류가 영이 아닌 경우 적분 값을 리셋하는 기능을 부가한다.

한편 콘덴서의 전압은 식 (10)을 이용하여 계산하며, 적분기를 사용하여 구현하면 그림 4와 같다. 여기서 부하전류는 주어진 부하에 따라서 정해지는 값을 이용하도록 하고, 콘덴서의 전류는 부하전류와 정류기의 출력전류로부터 식 (10)과 같이 구한다. 저항부하인 경우에 주어진 저항 값을 이용하여 부하전류를 구하는 부분을 그림 4에 나타내었다.

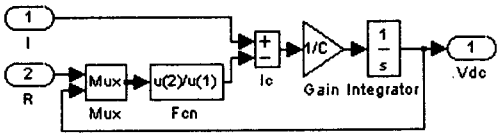


그림 4 저항 부하를 가진 콘덴서의 모델
Fig. 4 Model of a capacitor with a parallel resistor as a load

3상 다이오드 정류기의 동작모드 해석과 그림 3과 그림 4의 기본 모델을 바탕으로 Simulink로 구현한 3상 다이오드 정류기의 구성도는 그림 5와 같다. 전원부(Source)는 3상 대칭전압을 발생하고, 모드(Mode)부는 시간변화에 따라 3상 입력전압 중에서 전압크기가 최대, 최소, 중간인 상을 각각 판별하여 전압 선택신호(MAX, MIN, MID)를 발생하고, 최대 및 최소 전압을 가진 상의 변화시점에 대응하는 펄스신호(PN_P)를 발생한다.

신호제어(Signal Control)부는 모드부의 신호를 입력하여 (A), (B), (C)의 동작모드 변화에 대응하여 3가지 동작모드에 적절한 전압 선택신호를 발생한다. 여기서 전류중복 선택신호(PNo)는 인덕터 전류 i_{p2} , i_{n2} 중에서 하나를 선택하는 신호이다.

전압합성(Voltage Synthesis)부는 3상 전압과 전압 선택신호 및 전류중복 선택신호 등을 입력하여 정류기 출력전류에 대한 식 (1), 식 (4), 식 (8) 중에서 동작모드에 따른 적절한 인덕터 전압(V_L)을 합성하고, 또한 인덕터 전류에 대한 식 (5)와 식 (9) 중에서 역시 적절한 인덕터 전압(V_L2)을 합성하여 출력한다. 여기서 V_L2 인덕터 전압은 전류중복 시작조건에 대한 전압식으로도 사용된다. 전류(Current)부는 그림 3의 모델과 2가지 인덕터 전압을 이용하여 전류를 계산하여 출력하고, 전류중복구간에 대응하는 신호(Comm)와 (A), (B), (C)의 동작모드 변화에 대응한 제어신호(P/H)를 발생한다. 3상 전류(Iabc)부는 신호제어부와 전류부의 신호와 전류를 이용하여 3상 전류를 합성하여 출력한다. 직류 콘덴서(C Model)부는 그림 4의 모델로 정류기의 출력전류(I)와 저항 부하에 따른 직류전압을 계산하여 출력한다.

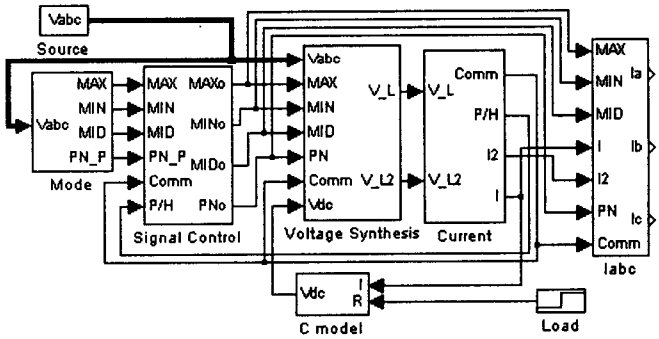


그림 5 3상 다이오드 정류기의 구성도
Fig. 5 Block diagram of a 3-phase diode rectifier

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 3상 다이오드 정류기 모델의 타당성을 보이기 위해 시뮬레이션에 사용한 회로정수는 표 1과 같으며, 전압은 편의상 선간전압에 대한 실효값을 사용한다.

표 1 회로정수
Table 1 Circuit parameters

Vll = 440 [V]	f = 60 [Hz]
L = 1.5 [mH]	C = 9.4 [mF]

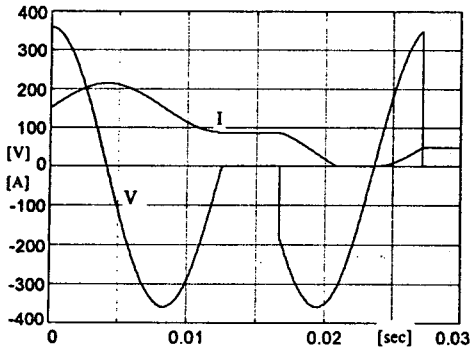
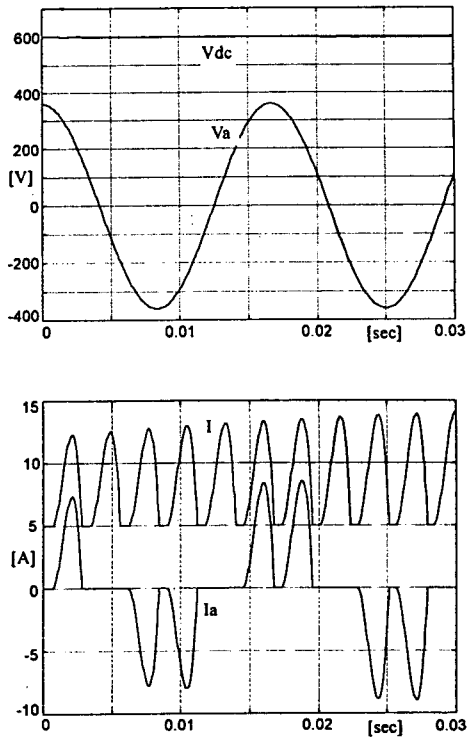


그림 6 제안한 다이오드와 인덕터 직렬회로 모델의 전압과 전류 파형

Fig. 6 Voltage and current waveforms of the proposed model of a series circuit with a diode and an inductor

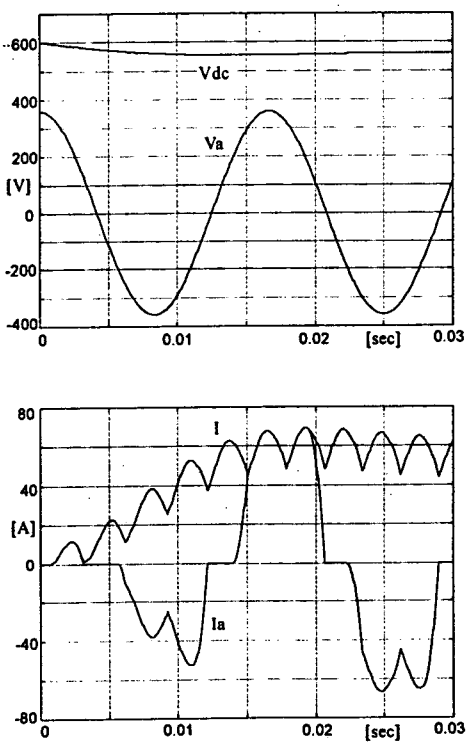
먼저 제안한 다이오드와 인덕터 직렬회로 모델인 그림 3에 대한 시뮬레이션 파형은 그림 6과 같다. 그림 6은 제안한 모델에 인가한 임의의 인덕터 전압(V)과 이 때 흐르는 인덕터 전류(I)를 나타낸 파형이며, 서로 다른 동작조건에서도 이상적인 다이오드와 인덕터 직렬회로의 특성을 보이고 있다.

그림 7은 3상 다이오드 정류기의 Simulink 모델인 그림 5를 이용하여 동작모드의 변화에 따른 3상 다이오드 정류기의 파형을 나타낸 것이다. 120[Ω] 부하저항에 대한 그림 7(a)는 정류기 출력전류(I)가 불연속으로 동작모드 1의 반복을 나타내는 파형이다. 상전압(Va)과 상전류(Ia) 파형은 전류부 모델이 이상적으로 동작함을 나타내고 있으며, 여기서 정류기 출력전류(I) 파형은 5[A]의 오프셋을 더하여 나타낸 것이고, Vdc는 직류전압 파형이다. 10[Ω] 부하저항에 대한 그림 7(b)는 3가지 동작모드가 모두 발생하는 파형으로 정류기 출력전류(I)와 상전류(Ia)가 모두 이상적인 3상 다이오드 정류기의 동작특성을 보이고 있다. 그리고, 상전류 파형에서 전류가 영이 아닌 부분과 정류기 출력전류의 크기가 다른 부분은 전류중복구간이고, 같은 부분은 동작모드 1을 나타내는 구간이다. 그림 8은 10[Ω] 부하저항에서 콘덴서의 초기전압이 400[V]일 때의 직류전압과 상전압 파형, 그리고 3상 전류 파형을 나타낸 것이다. 초기에 콘덴서를 충전하기 위해 큰 전류가 흐르고, 직류전압도 급격히 상승하는 것이 콘덴서의 초기전압 600[V]에 대한 그림 7의 파형과 다르다. 제안한 모델은 이 경우에도 적절히 동작함을 그림 8은 나타내고 있다. 따라서 그림 7과 그림 8에 나타낸 동작모드에 따른 직류전압, 전원전압, 정류기 출력전류, 그리고 3상 전류의 파형은 제안한 모델이 전류중복구간을 포함하는 3상 다이오드 정류기를 적절히 나타내고 있음을 보여준다.



(a) 동작모드 1의 반복

(a) Repetitive operations of mode 1



(b) 3가지 동작모드의 경우

(b) Case of 3 operating modes

그림 7 3상 다이오드 정류기 모델의 파형

Fig. 7 Waveforms of the model of a 3-phase diode rectifier

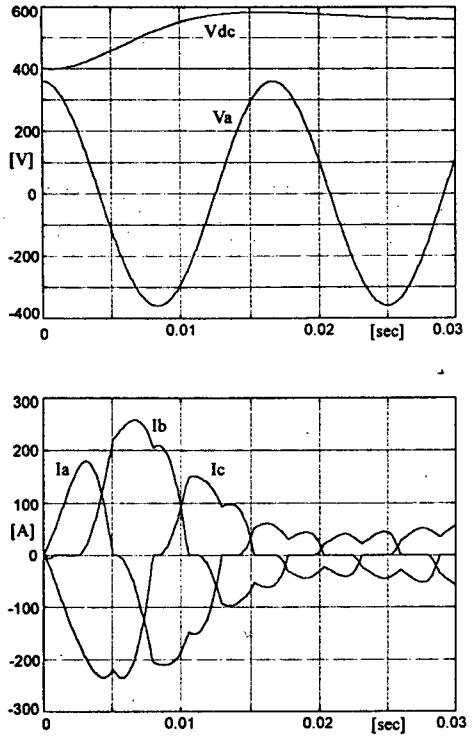


그림 8 3상 다이오드 정류기 모델의 충전시 파형
Fig. 8 Waveforms of the model of a 3-phase diode rectifier at the charging mode

5. 결 론

본 논문에서는 3상 다이오드 정류기의 해석을 위한 등가회로를 제시하고, 등가회로를 이용하여 전류중복을 포함하는 회로의 동작특성을 상세히 분석하였으며, 최근 널리 사용되는 Matlab/Simulink를 이용한 모델을 제시하고, 시뮬레이션을 통하여 제안한 모델의 타당성을 입증하였다. 향후 이 모델을 이용하여 다이오드 정류기를 포함하는 전력변환 장치의 설계를 위한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, Prentice Hall, 1998.

[2] 이진우, "오버슈트 없는 고속 디지털 전류제어기 설계", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제2호, pp. 163~169, 2000. 4.

[3] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, John Wiley & Sons, pp. 45~61, 1989.

[4] 박종훈, 정승기, "3상 다이오드 정류기에서 전원전압 불평형으로 인한 전원전류 불평형 해석", 추계 전력전자 학술대회 논문집, pp. 105~111, 1999. 11.