

0 전력용 반도체의 동작 원리

0.1 기본 스위치 동작

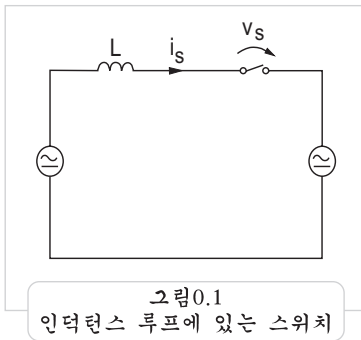
전력용 반도체는 특별한 경우를 제외하면 주로 온(on)/오프(off) 동작을 하는 스위치로서 이용되고 있다. 전력용 반도체의 개발이나 회로에의 응용에서 가장 중요한 점은 스위칭 소자 내에서 전력손실이 최소로 발생하게 하는 것이다. 이상적인 스위치의 조건은 다음과 같다.

이상적인 스위치

- 온 상태: $v_s = 0; -\infty < i_s < \infty$
- 오프 상태: $i_s = 0; -\infty < v_s < \infty$
- 스위칭 동작: 능동 턴-온/턴-오프 동안에 에너지변환이 발생하지 않음.

여기서, 능동(active)이라 함은 회로의 조건에 관계없이 임의의 시점에서 스위칭을 할 수 있음을 의미하고, 수동(passive)이라 함은 회로 조건에 따라 스위칭 동작이 결정됨을 의미한다. 이상적인 스위치 즉, 전력용 반도체의 스위칭 조건은 적용된 회로에 따라 달라진다.

인덕턴스 루프에 있는 스위치(인가 전류)



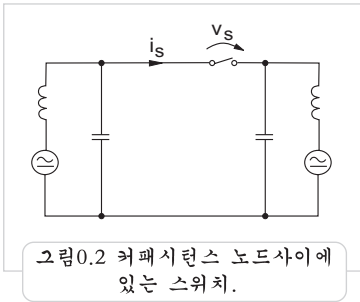
- 온 상태: $v_s = 0; -\infty < i_s < \infty$
- 오프 상태: $i_s = 0; -\infty < v_s < \infty$
- 스위칭 동작: $|v_s| > 0$ 에서 능동 턴-온
 $i_s = 0$ 에서 수동 턴-오프

그림 0.1 과 같이 스위치가 인덕턴스에 직렬로 연결된 회로에서 스위치는 능동 턴-온과 수동 턴-오프 동작을 한다. 스위치를 임의의 시점에서 턴-온하면 회로의 전압은 인덕턴스에 모두 인가되어 스위치에서의 전력손실은 없다.

회로에 전류가 흐르고 있으면 L에 저장된 에너지를 변환하지 않고 스위치를 턴-오프할 수 없다. 따라서, 회로에 전류가 흐르지 않을 조건에서만 ($i_s = 0$) 에너지변환이 없이 스위치를 턴-오프할 수 있다. 즉, 스위칭 순간이 회로의 전류조건에 따라 결정되므로 스위치는 수동 턴-오프한다. 이러한 스위칭 조건에서 동작하는 스위치를 영 전류 스위치(ZCS: zero-current-switch)라 한다.

커패시턴스 노드 사이에 있는 스위치(인가 전압)

그림 0.2 에서와 같이 스위치가 커패시턴스 노드에 병렬로 연결된 회로에서 스위치는 수동 턴-온과 능동 턴-오프 동작을 한다. 전압을 갖는 커패시턴스와 병렬로 연결된 스위치는 $v_s = 0$ 일 때만 턴-온할 수 있다. 즉, 스위치 전압이 영이 되는 시점이 외부 회로에 의해 결정되므로 수동 턴-온이다. 그러나, 임의의 시점에서 스위치를 능동 턴-오프할 수 있다. 이러한 스위칭 조건에서 동작하는 스위치를 영 전압 스위치 (ZVS: zero-voltage-switch) 라 한다.



- 온 상태: $v_s = 0; -\infty < i_s < \infty$
- 오프 상태: $i_s = 0; -\infty < v_s < \infty$
- 스위칭 동작: $|i_s| > 0$ 에서 능동 턴-오프
 $v_s = 0$ 에서 수동 턴-온

그림 0.3 은 이 상에서 설명한 기본 스위칭 과정 동안에 나타나는 스위치의 전압과 전류 파형을 나타낸다. 실제 전력용 반도체를 사용한 각 스위칭 과정에 대한 설명은 다음과 같다.

① 능동 턴-온 과정

능동 턴-온 전에 전력용 반도체에는 양의 전압이 인가되고 있다. 제어기로부터 턴-온 신호를 받으면 전압은 떨어지기 시작하고 전류는 전력용 반도체의 턴-온 과정에 의해 결정된 상승률로 증가한다. 그림 0.3 에서와 같이 전력용 반도체에 직렬로 연결된 인덕턴스가 있는 경우 전류와 전압의 스위칭 파형은 전력용 반도체의 턴-온 과정과 인덕턴스에 의해 결정된다. 직렬 인덕턴스의 값이 클수록 전력용 반도체에서 발생하는 턴-온 스위칭 손실은 감소한다.

② 수동 턴-오프 과정

그림 0.3 에서와 같이 회로에 전류가 흐르고 있을 때 회로의 전원전압이 전류방향과 반대의 극성이 되어야 전력용 반도체는 수동 턴-오프할 수 있다. 수동 턴-오프 과정동안에 전류가 계속 감소하여 역 방향으로 흐른다. 역 방향 전류는 전력용 반도체가 역 전압을 저지할 수 있는 능력을 회복할 때까지 흐른다.

③ 능동 턴-오프 과정

그림 0.3 에서와 같이 전류가 흐르고 있는 전력용 반도체에 턴-오프 신호를 인가하면 우선 순방향으로 전압은 상승한다. 전력용 반도체의 턴-오프 과정에 의해 결정된 전류를 뺀 나머지 전류가 병렬로 연결된 커패시턴스로 흐른다. 병렬 커패시턴스의 값이 클수록 전력용 반도체에서 발생하는 턴-오프 스위칭 손실이 감소한다.

Switching Process	Waveform	Equivalent Circuit
<p>active ON</p> $\frac{di_s}{dt} > 0 ; \frac{dV_s}{dt} < 0$		
<p>passive OFF</p> $\frac{di_s}{dt} < 0 ; \frac{dV_s}{dt} < 0$		
<p>active OFF</p> $\frac{di_s}{dt} < 0 ; \frac{dV_s}{dt} > 0$		
<p>passive ON</p> $\frac{di_s}{dt} > 0 ; \frac{dV_s}{dt} > 0$		
Basic Switching Processes		

그림.0.3 기본 스위칭 과정

④ 수동 턴-온 과정

수동 턴-온되기 전에 그림 0.3 에서와 같이 전력용 반도체는 역 전압으로 인가되어 있어야 한다. 외부 회로의 인가전류에 의해 전력용 반도체의 전압이 음에서 상승하여 영의 값을 지나 양의 값이 되면 전력용 반도체는 턴-온 상태가 되어 전류가 상승하게 된다.

모든 전력전자 시스템은 다음의 두 가지 기본 원리에 따라 동작한다.

- 한 스위치 단위로 턴-온, 턴-오프에 의해 회로간에 에너지 교환이 이루어진다. 이 동작을 한 스위치의 순환 스위칭 (cyclic switching) 이라 부른다.
- 두 스위치 단위로 교류 전류와 전압을 번갈아 스위칭을 한다. 이 동작을 전류 (轉流, commutation) 라 부른다.

두 기본원리를 한 회로로 또는 여러 가지 동작 모드를 갖는 회로에 같이 적용할 수 있다.

0.2 전력용 반도체의 동작 원리

한 스위치의 순환 스위칭과 인덕턴스 또는 커패시턴스 전류 (commutation) 동안의 능동과 수동 스위칭 과정으로 전력용 반도체의 동작원리를 설명하였다. 그림 0.4 는 다른 가능한 스위칭 과정의 전압과 전류파형을 보여준다.

하드 스위칭 (hard switching: HS, 그림 0.7)

하드 턴-온 (hard turn-on) 은 전류가 전류 (commutation) 하는 시간 t_k 동안 전류가 흐르는 스위치 S_1 에 거의 전체 전압 v_k 가 인가되어 스위치에 상당히 큰 전력 손실을 발생시킨다. 그림 0.7 에서 부하전류가 아래 스위치 S_2 의 다이오드를 통해 흐르고 있을 때 스위치 S_1 에 턴-온 신호를 인가하면 스위치 S_1 의 전류는 전류 인덕턴스가 매우 작으므로 S_2 의 다이오드 턴-오프특성에 따라 증가하여 그림 0.4 에서와 같이 부하전류 이상의 값에서 스위치 전압 v_s 가 영으로 떨어진다. 이 순간에 스위치에서 발생하는 전력 손실은 최대가 되고 그 값은 매우 크다. 그 후 모든 부하전류는 스위치 S_1 을 통하여 흐르고, S_2 의 다이오드는 수동 턴-오프 된다. 하드 턴-온 시에는 전류 시간과 스위칭 시간은 거의 같다.

하드 턴-오프 (hard turn-off) 인 경우에는 스위치 S_1 의 전압이 v_k 이상의 전압까지 상승하면 스위치 전류가 감소하기 시작한다. 전류 (commutation) 는 S_2 의 다이오드의 수동 턴-오프에 의해 시작된다. 전류 커패시턴스가 매우 작으므로 전압의 상승은 전력용 반도체 특성에 의해 결정된다. 전류 시간과 스위칭 시간은 거의 같고, 스위치 내에 매우 큰 스위칭 손실이 발생한다.

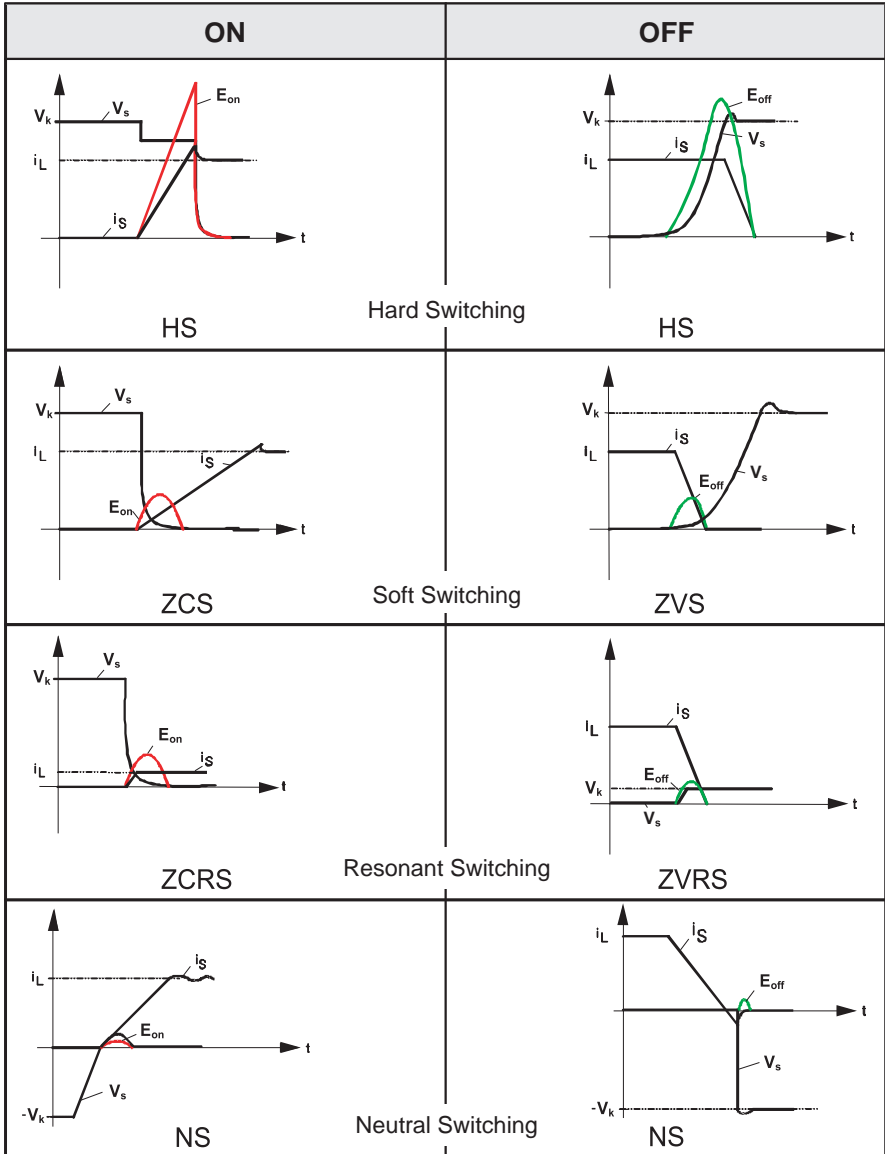


그림 0.4 스위칭 과정 ($V_k =$ 인가전압, $i_L =$ 부하전류).

소프트 스위칭(soft switching: ZCS, ZVS, 그림 0.8 과 그림 0.9)

소프트 스위칭은 영 전류 조건에서 턴-온 (ZCS) 하고 영 전압 조건에서 턴-오프 (ZVS) 한다. 그림 0.8 에서 전류 인덕턴스 L_k 가 충분히 크면 영 전류 스위치의 소프트 턴-온인 경우 스위치 전압은 비교적 빠르게 매우 작은 값의 순방향도통전압으로 떨어진다. 그러므로, 전류가 전류 (commutation) 하는 동안에 스위치의 전력손실은 거의 불가피하다. 전류 인덕턴스 L_k 는 스위치에 흐르는 전류 증가를 결정한다. 전류과정은 스위치 S_2 의 수동 턴-오프에 의해 종료되므로 스위칭 시간 t_s 에 비해 전류 시간 t_k 가 길다.

그림 0.9 에서 스위치 S_1 의 능동 턴-오프는 영 전압 스위치의 소프트 턴-오프이다. 스위치 S_1 으로 흐르던 부하전류는 병렬로 연결된 전류 커패시턴스 C_k 로 이동하고, 전압 전류 (commutation) 과정을 야기시킨다. 그림 0.4 에서와 같이 전류 커패시턴스 C_k 는 스위치 전압의 상승을 결정하고, 상승이 늦을수록 스위치에서의 전력 손실은 감소한다.

공진 스위칭(resonant switching: ZCRS, ZVRS, 그림 0.10 과 그림 0.11)

공진 스위칭은 공진에 의한 영 전류 조건에서 턴-온 (ZCRS) 하고 영 전압 조건에서 턴-오프 (ZVRS) 한다. 그림 0.10 에서 부하전류 i_L 이 거의 영이 되는 순간에 영 전류 스위치를 턴-온할 때 이를 공진 턴-온 (resonant turn-on) 이라 한다. 소프트스위칭에 비해 스위칭 손실이 더욱 작다. 스위치가 영 전류가 되는 시점을 능동적으로 결정할 수 없으므로 스위치의 제어성은 제한적이다.

반면, 그림 0.11 에서 외부 회로에 의해 턴-오프 과정동안 전류 (commutation) 전압이 거의 영일 때 영 전압 스위치를 턴-오프하면 이를 공진 턴-오프 (resonant turn-off) 라 한다. 소프트스위칭에 비해 스위칭 손실이 작고, 스위치의 제어성은 제한적이다.

뉴트럴 스위칭(neutral switching: NS, 그림 0.12)

스위치 전압과 전류가 모두 영일 때의 스위칭을 뉴트럴 스위칭이라 하며, 대부분 다이오드의 경우에 발생한다. 스위칭 손실은 작으나 턴-온과 턴-오프가 단지 회로조건에 의해서만 결정되므로 제어성은 없다.

0.3 전력전자스위치

전력전자 스위치 (power electronic switch)는 전력용 반도체, 구동회로와 보호 회로를 조합하여 집적된 시스템이다. 집적된 시스템 내부의 기능적 상호관계와 작용이 스위치의 주요 특성을 결정한다.

그림 0.5는 외부 전력회로(보통 높은 전압에서 동작)와 제어회로(정보처리, 보조 전원)과의 인터페이스 (interface)를 하는 전력전자 스위치 시스템을 나타낸다. 광 (optical) 소자 또는 유도 (inductive) 전달소자를 이용하여 낮은 전압의 제어회로는 높은 전압의 외부 전력회로와 전기적으로 분리된다.

그림 0.6은 스위치의 전압과 전류의 방향에 따른 전력용 반도체의 가능한 구성을 나타낸다.

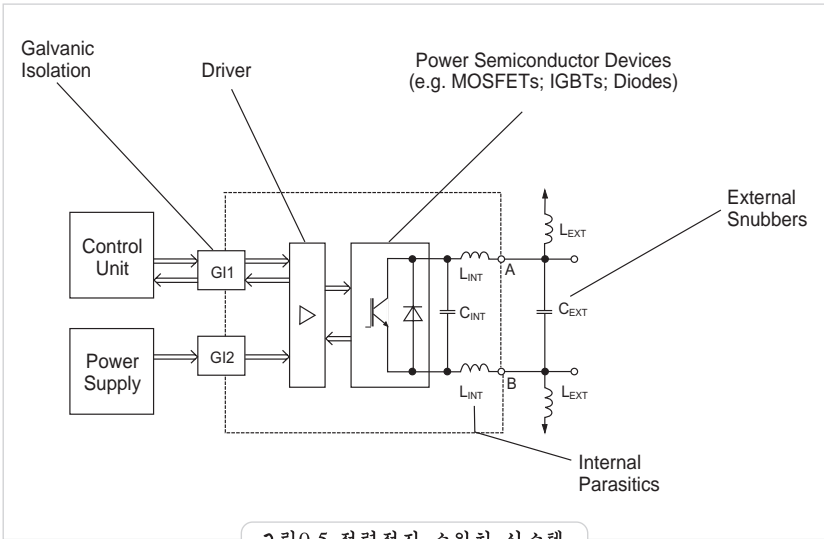

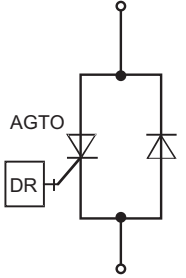
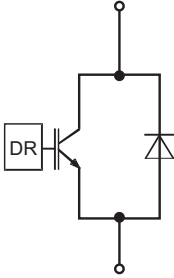
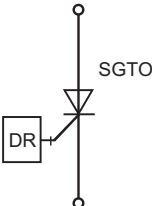

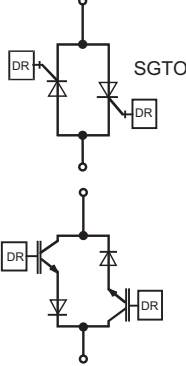
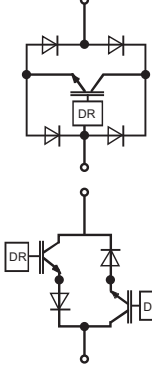


그림 0.5 전력전자 스위치 시스템.

전력전자 스위치의 기본 형태

회로의 주 특징을 결정하는 전력용 반도체의 동작원리에 따라 전력전자 스위치는 다음의 기본 형태로 나눌 수 있다. 전류와 전압의 방향은 각기 회로 요구 조건으로부터 결정된다.

V_s / i_s	current-unidirectional	current-bidirectional	
voltage-unidirectional (forward blocking)			
voltage-bidirectional (forward and reverse blocking)			 

SGTO = symmetrical GTO AGTO = asymmetrical GTO

그림0.6 전력용 반도체의 가능한 구성

하드 스위치 (hard switch: HS, 그림 0.7)

이론적인 순저항 부하인 경우를 제외하면 하드 턴-온과 턴-오프 동작을 하는 하나의 스위치는 최소의 에너지를 저장하는 수동 소자 (C_{kmin} ; L_{kmin})를 갖는 전류회로에서 뉴트럴 스위칭이 가능한 전력용 반도체와 함께 오직 사용할 수 있다 (그림 0.7 참조). 제어성이 없는 뉴트럴 스위치와 비교하면 하드스위치는 각기 조절이 가능한 턴-온과 턴-오프 두 가지의 제어성을 갖는다. 그림 0.7은 가능한 스위치 구성을 나타낸다. 대칭적으로 스위치를 배열하였으나 단지 하나의 교류 스위치가 두 가지의 제어성을 갖고 능동적으로 동작하고, 다른 스위치는 뉴트럴 스위칭을 한다.

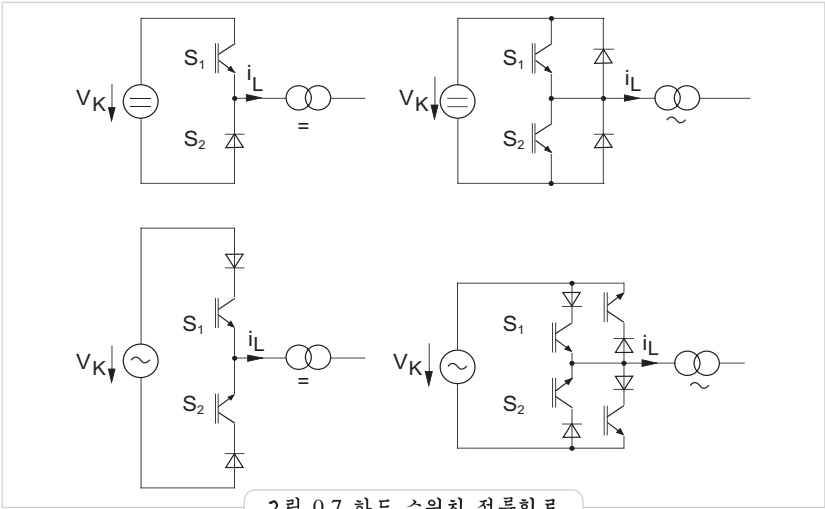


그림 0.7 하드 스위치 전류회로.

영 전류 스위치(zero-current switch: ZCS, 그림 0.8)

영 전류 스위치로 동작하는 전력용 반도체는 능동 턴-온과 수동 턴-오프를 한다. 하드스위치에 비해 제어성 하나를 잃은 덕분에 능동 스위칭 동안 충분히 큰 전류 인덕턴스에 의해 스위치에서의 전력손실을 상당히 줄일 수 있다. 그림 0.8은 등가 전류회로를 갖는 ZCS의 가능한 스위치 구성을 나타낸다. 이 회로 구성은 전류가 없는 순환 스위칭을 하는 회로에 적용할 수 있다. 이러한 회로는 연속적인 인덕턴스 전류과정이 발생하여 능동 턴-온 후에 수동 턴-오프가 뒤따른다.

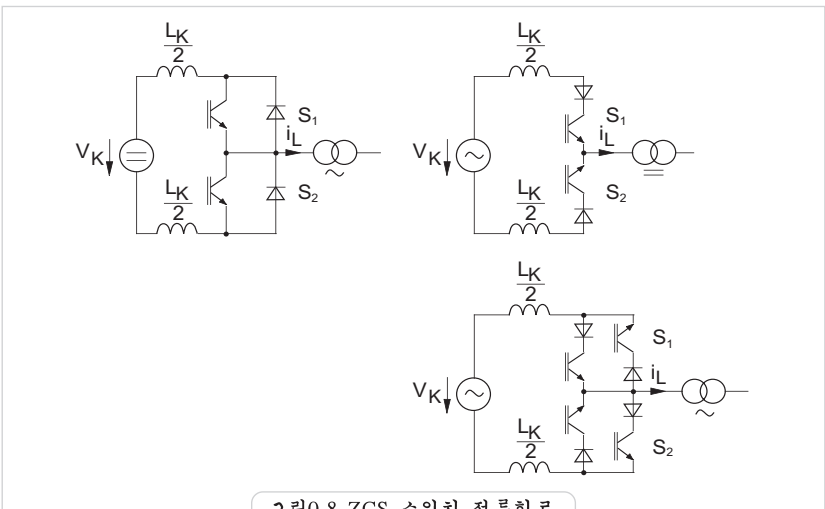


그림 0.8 ZCS 스위치 전류회로.

영 전압 스위치(zero-voltage switch: ZVS, 그림 0.9)

영 전압 스위치는 능동 턴-오프와 스위치 전압이 영이 될 때 수동 턴-온의 스위칭을 한다. 병렬 연결된 전류 커패시턴스가 충분히 크면 능동 턴-오프할 때 스위칭 손실이 매우 작다. 제어성 하나를 잃은 덕분에 하드 스위치에 비해 스위치 전력 손실이 작다. 그림 0.9는 커패시턴스 전류회로를 갖는 영 전압 스위치의 가능한 구성을 보인다. 영 전압 스위치는 전류가 없는 회로에 적용할 수 있고, 같은 스위치에서 능동 턴-온과 수동 턴-오프가 반복한다.

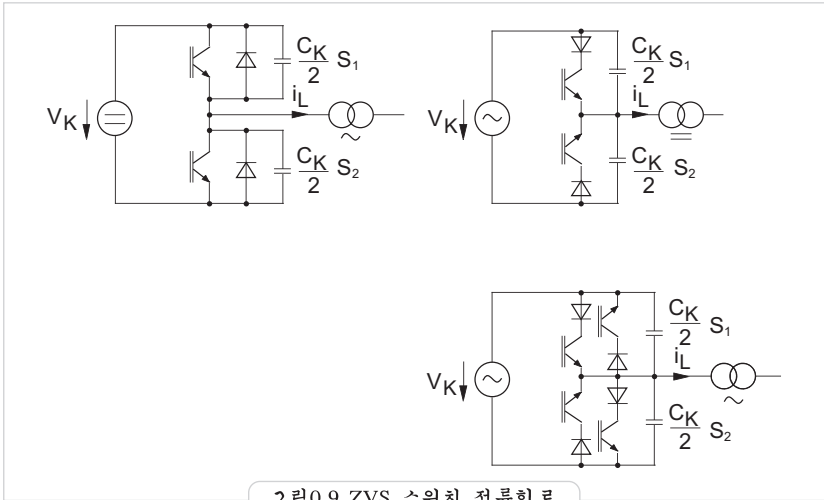


그림 0.9 ZVS 스위치 전류회로.

영 전류 공진 스위치(zero-current-resonant switch: ZCRS, 그림 0.10)

만일 영 전류 스위치를 전류가 영이 되는 시점에서 능동 턴-온하면 전류의 전류과정은 없다. 그러므로 전류 인덕턴스가 최소일지라도 전력손실은 영 전류 스위치에서 보다 작지만 전력용 반도체의 접합 커패시턴스의 필요충전 때문에 전력손실이 발생된다. ZCS 보다 스위칭 손실은 감소하나 능동 턴-온과 같이 턴-온 순간을 임의로 제어하지 못하고 외부 회로에 의해 영 전류가 되는 시점에서 수동 턴-오프에 따라 제어성이 상실되었다. ZCRS은 몇 전류 주기를 동 통 또는 저지하는 방법으로 에너지 흐름을 단지 간접적으로 제어할 수 있다.

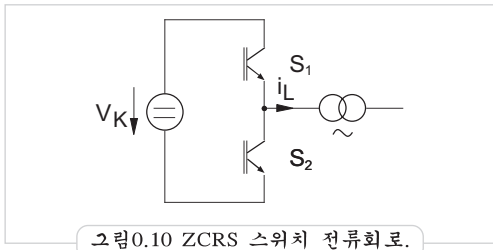
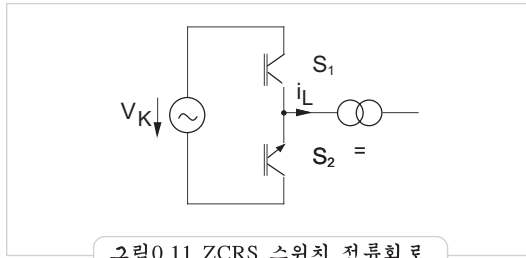


그림 0.10 ZCRS 스위치 전류회로.

영 전압 공진 스위치 (zero-voltage-resonant switch: ZVRS, 그림 0.11)

ZVS 를 인가된 전류 (commutation) 교류전압이 영이 되는 시점에 능동 턴-오프하면 반대 방향으로 증가되는 전압에 의해 전류 전류과정이 시작된다. 능동 제어성의 상실에 의해 최소 전류 커패시턴스인 경우일지라도 스위칭 손실은 감소한다. ZVRS 에서는 몇 전류 (commutation) 전압주기를 연결하거나 또는 차단하는 방법으로 간접 제어만이 가능하다.



뉴트럴 스위치 (neutral switch: NS, 그림 0.12)

뉴트럴 스위치의 뉴트럴 턴-온 또는 턴-오프에 의해 전류과정이 끝난다. 이 경우 전류와 전압 강하는 영이다. 일반적으로 다이오드가 이러한 특징을 갖는다. 능동 스위칭이 가능한 전력용 반도체로 뉴트럴 스위치를 구성하기 위해서는 특별한 구동회로가 필요하다.

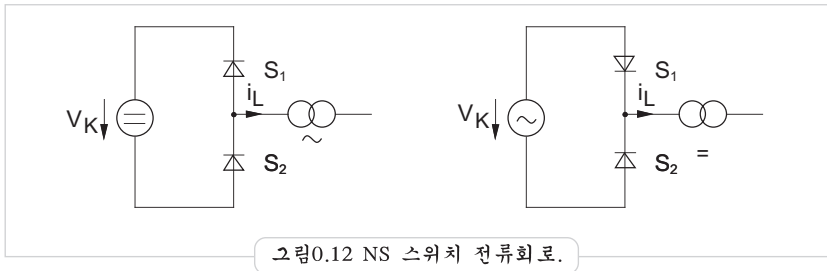


그림 0.13 은 전력전자 스위치의 기본형을 나타낸다. 빈칸은 대부분의 응용에서 필요한 기본 형태의 수정을 나타낸다. 소프트 또는 공진 스위치와 동작하는 회로에서 공진조건이 깨지면 전체시스템의 동작을 유지하기위해 스위치들은 본래 특성과는 달리 하드 스위칭을 해야 한다 (수정 ZVS: modified ZVS-MZVS, 수정 ZCS: modified ZCS-MZCS, 3.8 장 참조). 스위치는 대부분 매우 짧은 시간동안 틀어진 모드에서 동작한다. ZVS 의 하드 능동 턴-오프 또는 ZCS 의 하드 능동 턴-온인 경우 스위치는 각각 ZVHS 또는 ZCHS 로 동작한다.

ON OFF	hard	soft L_k in Series	Resonant $i_L = 0$	neutral $V_s = 0$
hard	HS	MZCS		ZVHS
soft C_k in Parallel	MZVS			ZVS
resonant $V_k = 0$				ZVRS
neutral $i_s = 0$	ZCHS	ZCS	ZCRS	NS

그림0.13 전력전자 스위치.