

# 3相 Thyristor Inverter動作

## Mode의 Vector解析法(II)

黃 煥 文\*

— 차 레 —

- 4. 3相 inverter의 여러가지 負荷에 대한 thyristor電流 vector의 解析
- 4-1. Reactive負荷에서의 電流 vector軌跡

- 4-2. Inverter電流vector diagram
- 4-3. 直列 R-C負荷에서의 電流vector軌跡
- 5. Inverter 電流 vector diagram에서의 轉流作用解析

### 4. 3相 inverter의 여러가지 負荷에 대한 thyristor 電流 vector의 解析

3相 inverter회로에서의 thyristor電流  $I$ 는식 (2)와 (3)에서 다음과 같이 표시된다.

$$I = C^{-1}i \dots \dots \dots (11)$$

여기서  $i$ 는 inverter電流 matrix이며,  $C^{-1}$ 은 식(3)에서 보는 바와 같은 非對稱 vector matrix이다. 그러므로 이것의 逆 matrix는 쉽게 구하여 지지 않는다. 이는 inverter의 出力電壓은 일정한 點弧 sequence에 의하여 결정되고, vector diagram상에서 보면  $\pi/3\omega$ 만큼의 位相 interval을 두고 일정한 位置를 갖도록 되어있다. 따라서 각 thyristor에 導通하는 電流는 하나의 interval사이에서도 몇개 thyristor를 겹쳐서 흐르게 되므로 각 thyristor電流의 흐르는 상태가 on-off를 계속하고 있어, inverter電流도 inverter電壓과 負荷力率과의 사이에서 정해지는 일정한 電流 vector를 갖지 못하게 되어, 이것의 해석이 어렵게 된다.

다시말하면, 전번의 그림 4에서의  $e(6)$ 과  $e(1)$ 의 첫번째  $\pi/3\omega$  interval에서는 出力側 inverter phase電壓은 導通된 thyristor 5, 6 및 1에 의하여 이루어지고, 다음 두번째  $\pi/3\omega$ 에서는 導通된 thyristor 6, 1 및 2에 의하여 이루어 진다. 이때 負荷가 純抵抗인 경우는 inverter phase電流가 inverter phase電壓과 同相이기 때문에, 點弧 sequence에 따라 각 thyristor가 導

通하면 별문제가 없으나, 負荷가 reactive load이거나, active load인 때는 phase電流가 phase電壓과 어떤 位相角을 갖고 있기 때문에, 點弧 sequence에 의한 게이팅時期와 각 thyristor의 要導通時期가 일치하지 않는 애로점이 있다. 다시 말하면, 遲相力率負荷인 경우 點弧信號가 들어가 thyristor가 導通되고 phase電壓이 형성되어도 負荷電流는 게이팅과 동시에 電流가 흐르지 않으며, 負相位相角에 해당하는 기간후에야 비로소 電流가 흐르게 되는데, 이는 이때까지 點弧信號는 계속되어야 할 것이다.

이는 thyristor element의 일반적특성이 點弧信號가 인가되었더라도 thyristor의 latching電流이하의 電流가 흐르게 될때, 點弧信號가 멈추면 導通이 동시에 멈추게 되므로, 특히 펄스형點弧信號에 대하여는 點弧失敗가 일어나게 된다.

한편 消弧作用에서도 마찬가지로, 각  $\pi/3\omega$  interval에서 해당 要導通 thyristor가 아닌 것은 消弧되어야 하는데, 바로 앞의  $\pi/3\omega$  interval에서 導通하고 있던 thyristor가 遲相된 負荷電流에 의하여 自己導通 interval이 아닌 다음 interval까지 계속 電流가 흐르게 되면 latching電流보다 적은 電流가 아니므로 強制消弧를 시켜 주어야 하는 필요성을 갖게 된다.

이러한 관계를 解析하고, 이에 의하여 補助回路 및 補完回路를 구성하기 위하여는 여러가지 負荷力率에 대한 thyristor요소 的 電流 vector의 變化 즉, 軌跡을 조사할 必要가 있다.

#### 4-1. Reactive負荷에서의 電流 vector軌跡

지금, 하나의  $\pi/3$  interval중의 電流 vector軌跡를

\* 正會員 : 釜山대工大教授(工學博士)

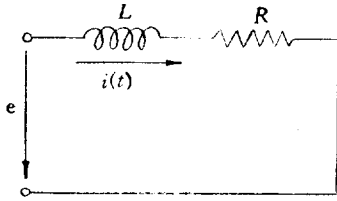


그림 6. 直列 R-L 負荷回路

구함에 있어서, 6개의 電壓 vector의 位置 중 어느 것을 선정하여도 마찬가지일 것이다. 그리하여 우선 첫번째와 5번째의  $\pi/3$  interval이 모두 實數分(real part)임으로 풀이가 간단하여 질 것이다. 負荷回路는 가장 일반성 있는 그림 6과 같은 Series R-L load를 예를 들기도 한다.

지금 電壓 vector가  $\bar{e}(6)$ 에서  $\bar{e}(1)$ 로 바뀔때,

$$t = -0인 때 : \bar{e} = \bar{e}(6)$$

$$t = +0인 때 : \bar{e} = \bar{e}(1)$$

로 되며, 그림 6에 대하여

$$e = iR + L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (12)$$

이고, 그 解는

$$i(t) = \frac{e}{R} + K\epsilon^{-t/T} \dots\dots\dots (13)$$

이 된다. 여기서  $K$ 는 Constant vector이고,  $T = L/R$ 이다. 初期條件에 의하여  $K$ 는 정하여 진다. 동시에 電流 vector의 初期值  $I_0$ 가 구하여 지는데, 즉

$$t = 0 : i(t) = I_0, \quad t = \pi/3\omega : i(t) = I_0\epsilon^{j(\pi/3)}$$

이므로

$$I_0 = \frac{e}{R} + k \dots\dots\dots (14)$$

$$I_0\epsilon^{j(\pi/3)} = \frac{e}{R} + k\epsilon^{-(\pi/3\omega T)} \dots\dots\dots (15)$$

가 된다. 여기서  $\omega$ 는 基本 周波數이다.

식 (14)와 (15)에서 電流 vector의 初期値는

$$I_0 = \frac{e}{R} \frac{1 - \epsilon^{-(\pi/3\omega T)}}{\epsilon^{j(\pi/3)} - \epsilon^{-(\pi/3\omega T)}} \dots\dots\dots (16)$$

가 된다.

이러한 初期電流 vector는 負荷의 定數  $R$  및  $L$ 에 따라, 그리고 周波數에 따라 변화하며, 그 軌跡은 圓을 그리게 되며,  $\pi/3$  rad범위내에 있게 된다. 그림 7을 이러한 관계를 표시하고 있다.

電流 vector의 軌跡(path)의 方程式은 식 (13)에 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$i(t) = \frac{V_{dc}}{R} (1 - \epsilon^{-(t/T)}) + I_0\epsilon^{-(t/T)} \dots\dots\dots (17)$$

이 식에 식 (16)의  $I_0$ 의 값을 대입하고,  $\epsilon^{j\pi/3} = \frac{1}{2} + j\sqrt{3}/2$ 의 값을 대입하여, 實數, 虛數分으로 나누어

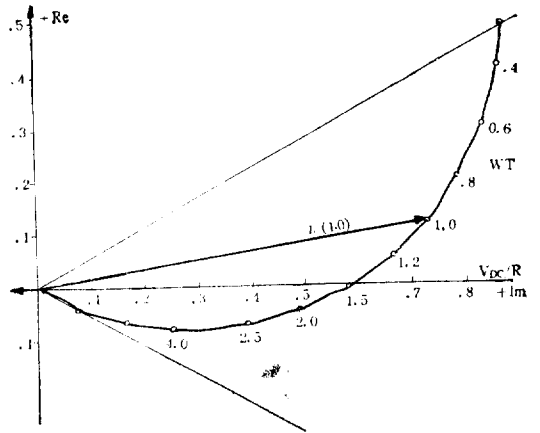


그림 7. 初期電流  $I_0$ 의 vector locus

정리하면, 식 (17)은

$$i(t) = \frac{V_{dc}}{R} \left[ 1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 + \epsilon^{-\pi/3\omega T})\epsilon^{-t/T}}{1 - \epsilon^{-\pi/3\omega T} + \epsilon^{-2\pi/3\omega T}} \right] - j \frac{V_{dc}}{R} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{(1 - \epsilon^{-\pi/3\omega T})\epsilon^{-t/T}}{1 - \epsilon^{-\pi/3\omega T} + \epsilon^{-2\pi/3\omega T}} \right] \dots\dots\dots (18)$$

지금, 이를 實數分과 虛數分으로 나눈

$$i(t) = Re\{i(t)\} + jIm\{i(t)\}$$

에서 實數分과 虛數分을 비교하여 정리하면

$$Im\{i(t)\} = \sqrt{3} \frac{1 - \epsilon^{-\pi/3\omega T}}{1 + \epsilon^{-\pi/3\omega T}} \left[ Re\{i(t)\} - \frac{V_{dc}}{R} \right] \dots\dots\dots (19)$$

가 된다. 식 (19)에서 電流 vector軌跡을 그리면, 그림 8에서와 같이 直線이 된다. 그리고 初期值 ( $t=0$ )

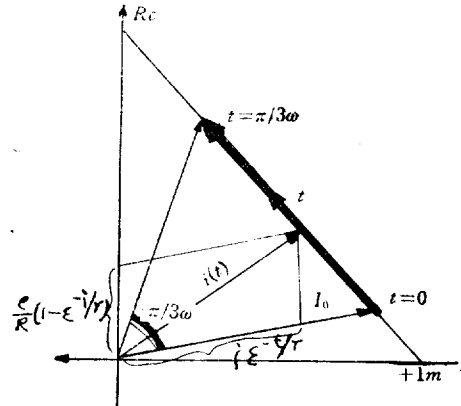


그림 8. 直列 R-L 負荷시의 電流 vector軌跡

와 最終值 ( $t = \pi/3\omega$ )는 그 크기가 같고  $\pi/3\omega$ 만큼 偏倚된다.  $t=0$ 에서 같은 식 (16)과 그림 7에서와 같이 負荷力率과 周波數에 따라 달라지며, 一定負荷인 경우에는 각  $\pi/3\omega$ 의 interval에서는 모두 일정하다. 그러나 3相 Bridge inverter의 경우 각 interval에서의 動作 mode가 약간씩 달라짐으로 엄격히 말하면 약간씩 다른 값을 갖게 된다. 이에 대하여는 다음에 상세히 설명하기로 하고, 여기서는 우선 6개의 主 interval에서

의 電流 vector에 대하여 설명하기로 한다

4-2. Inverter電流 vector diagram

앞서 말한 바와 같이 inverter의 出力 phase電壓은 각 thyristor의 點 3弧 sequence에 따라 변화하며, 대표적인 3相 Bridge回路에서의 inverter 電壓 vector diagram은 그림 9와 같다. 電流  $i(t)$ 의 vector軌跡은 直流電源  $V_{dc}$ 에 따라 변화함으로, 만일 基準電壓으로  $V_{dc}(1)$ 이 취하여 지면, 첫  $\pi/3$  interval에서는 直線 AB로 표시된다. 동일한 과정에서  $V_{dc}(2)$ 가 기준전압으로 취하여 지면 直線 Bc로 되며, 결과적으로 點弧

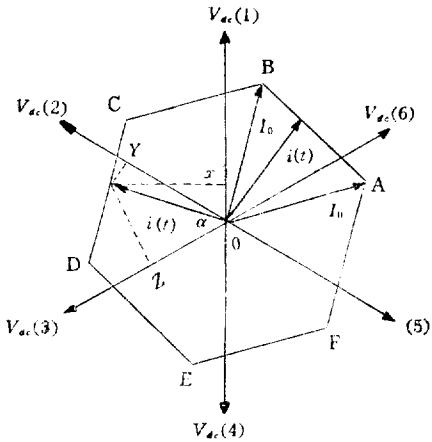


그림 9. Inverter의 電流 vector diagram

Sequence가 1, 2, 3, 4, 5 및 6의 순서로 thyristor를 導通시키면, 電流 vector의 全軌跡은 六角形 ABCDEFA와 같이 된다.

이때 각각의 thyristor에 흐르는 電流는  $i(t)$ 의 각각의 thyristor電壓 vector에 투영(project)되는 成分으로 표시된다. 예를 들면, thyristor 1, 2 및 3이 點弧되었다면,  $i(t)$ 의 電流成分은 각각 OX, OY, 및 OZ가 된다.

이러한 電流成分은 3相回路의 理論에 의하면, 그 합이 零이 되어야 한다. 즉,

$$OX + OY + OZ = 0 \dots\dots\dots (20)$$

그림 9에서와 같이  $i(t)$ 가  $V_{dc}(3)$ 보다  $\alpha$ 각만큼 lag되었다고 하면

$$OX = i(t) \cos(2\pi/3 - \alpha)$$

$$OY = i(t) \cos(\pi/3 - \alpha)$$

$$OZ = i(t) \cos\alpha$$

이다. 그런데 thyristor 2에서의 電流는 3相 負荷結線에서, 中性點에 대하여 thyristor 1과 3과는 반대방향으로 흐르므로, 電流의 합은

$$i(t) \cos(2\pi/3 - \alpha) - i(t) \cos(\pi/3 - \alpha) + i(t) \cos\alpha = 0 \dots\dots\dots (21)$$

가 됨을 알 수 있다.

4-3. 直列 R-C 負荷에서의 電流 vector軌跡

그림 10(a)와 같은 直列 R-C 負荷에서의 電流 vector는 進相vector가 되면, 그림 10(b)와 같이 閉 loop가 되지 않는다. 이를 살펴보면 그림 10(a)에서

$$e = iR + U_c \dots\dots\dots (22)$$

여기서

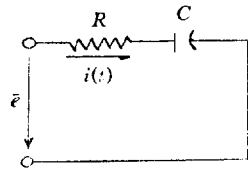
$$U_c = \frac{1}{C} \int i dt + U_{c0} \dots\dots\dots (23)$$

이다. 그러므로

$$i(t) = \frac{e - U_{c0}}{R} = I_m e^{-t/T} \dots\dots\dots (24)$$

$$T \equiv RC$$

된다. 콘덴서 電壓의 初期值  $U_{c0}$ 는



(a) series R-C Load

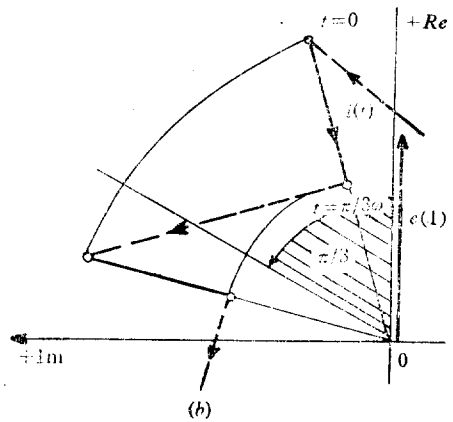


그림 10. 直列R-C 負荷시의 電流 vector軌跡

$$U_{c0} = e \frac{1 - e^{-(\pi/3\omega T)}}{e^{j(\pi/3)} - e^{-(\pi/3\omega T)}} \dots\dots\dots (25)$$

이고, 그러므로

$$i(t) = \frac{e}{R} \cdot \frac{e^{j(2\pi/3)}}{e^{j(\pi/3)} - e^{-(\pi/3\omega T)}} e^{-t/T} \dots\dots\dots (26)$$

가 된다. 따라서 電流 vector는 그림 10(b)와 같이  $\pi/3$  rad내에 놓이게 되며, 電壓과 電流 vector의 位相轉移(phase shift)는 주어진 周波數와 時定數가 정하여지면 一定한 값을 갖는다.

5. Inverter 電流 vector diagram에서의 轉流作用 解析

轉流作用 (commutation action)은 導通 thyristor에서 흐르는 電流를 停止 혹은 轉換(diverting)시키는 작용을 말한다. 그리고 電流는 到來位相電壓(oncoming phase voltage)에 의하여 강제 傳達되도록 한다. 그림 11을 보면, 지금 각 thyristor가 一定周波數에서 點弧順序에 따라 點弧하되, thyristor 5와 6이 導通하고 있는 상태에서 설명하자. thyristor 1이 點弧하면, 電壓  $V_{ac}(1)$ 은 thyristor 5의 電流를 thyristor 1로 전환하도록 할 것이다. 그리하여 정상상태에 도달하면 thyristor 3의 電流가 零이 된다. 즉, 電流 vector  $i(t)=OM$ 는 電壓 vector  $V_{ac}(5)$ 에 直角이 된다. 이 상태에서 thyristor 6과 1은 같은 크기(OH와 OJ)의 電流가 흐른다.

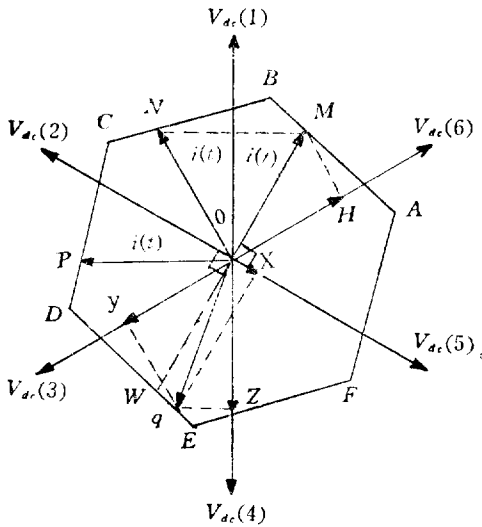


그림 11. Inverter의 轉流作用 vector diagram.

다음에 thyristor 2가 點弧하여 정상상태에 다시 이르면, 電流 vector  $i(t)$ 는  $\pi/3$  rad만큼 회전하게 되어 ON의 위치에 오게 된다. ON는 電壓 vector  $V_{ac}(6)$ 에 수직이다. 이 때문에 thyristor 6에 導通을 멈추게 된다. 그리고 thyristor 2로 電流가 전환된다.

vector  $i(t)$ 가  $\pi/3$  rad 이상으로 회전하는 사이에 thyristor 1은 導通을 계속하며, thyristor 3이 點弧하고 다시 정상상태에 도달하여  $i(t)$ 가 OP에 이르렀을 때까지 지속된다. 그리하여 thyristor 1의 電流는 thyristor 3으로 전환된다. 이러한 과정이 계속하여 thy-

ristor 5와 6이 다시 導通할 때 한 周期는 끝난다.

이상과 같이 각 thyristor는 한 周期의 1/3동안 導通하고, 1/6동안 轉流作用을 하며, 電流 vector  $i(t)$ 가 해당 電壓 vector의 수직에 놓이게 될 때 비로소 導通이 멈추게 된다. 이러한 현상은 輕誘導性負荷인 경우에서만 일어난다. 그러나 重誘導性負荷인 때는 좀 다르다.

重誘導性負荷(large inductive load)을 갖는 inverter의 動作은 어떤 thyristor를 통하여 흐르는 電流가 다른 thyristor를 통하여 흐르는 電流가 생기기 전에 멈추게 되는 수가 있다. 지금 그림 11에서 보면,  $i(t)$ 의 電流軌跡 DE에서의 WE의 사이에서는 thyristor 2는 導通이 멈추고, 5는 아직 點弧되지 않았고, thyristor 3과 4는 導通하고 있는 상태이다.

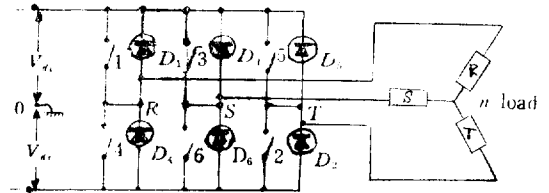


그림 12. Feedback diode에 의한 轉流作用 改善 回路

여기서 WE사이의 電壓 vector 2의  $i(t)$ 의 성분은 負(negative) 즉, 反對方向이다.(OX) 이러한 負値는 負荷側에서 inverter로 에너지를 再生시키는 것을 말한다. 그리하여 thyristor 2에 높은 逆電壓을 갖게 하여 파괴시킬 우려를 남게 한다. 이를 피하기 위하여 이러한 에너지는 다른 방법을 강구하여 소모시키거나 전환시켜야 한다. 이것이 轉流作用回로를 필요로 하는 원인이다.

지금 이러한 것의 한 방법으로서 WE의 거리를 될 수 있는대로 짧게 하기에 충분한 큰 轉流캐패시턴스를 이용하여, 負荷力率을 조정하면, 電流 vector  $i(t)$ 가 OW의 위치에 올때 thyristor 5를 點弧시키게 할 수 있다. 그러나 이러한 방식은 動作周波數가 낮은 경우, 대단히 큰 캐패시타가 필요하다.

현재 많이 이용되는 방법으로는 그림 12에서와 같이 feedback diode ( $D_1-D_6$ )을 접속하는 방식이 있다. diode는 主 thyristor bridge가 轉流作用을 하고 있는 동안, 逆電流(reverse current)를 통과시키게끔 하는 방식이다. 예를 들면, 그림 11에서  $i(t)$ 가 WE사이를 움직이고 있는 期間에서는 diode  $D_2$ 가 導通하게 한다.

(다음호에 계속)