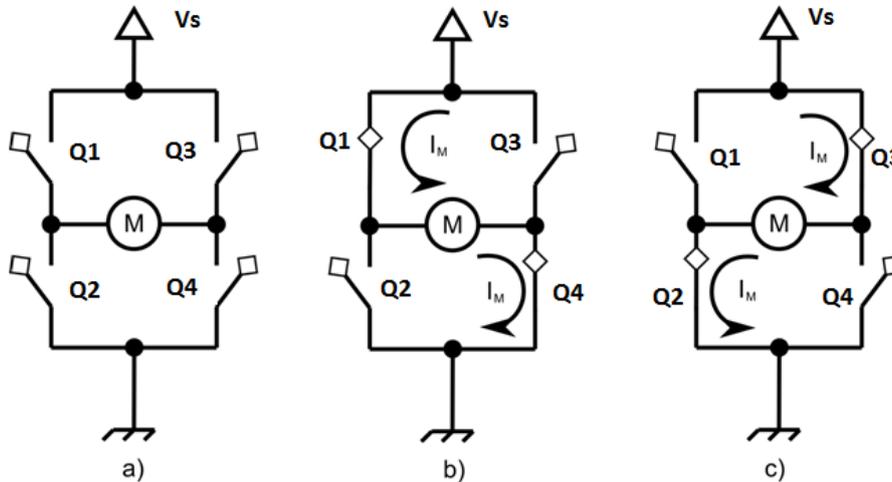


# Ponte H

In generale un *ponte H* è un circuito piuttosto semplice, formato da quattro interruttori elettronici che pilotano un carico, posto al centro.



Nella configurazione *a*) i quattro interruttori (Q1..Q4) sono tutti aperti, pertanto il carico (in questo caso un motore elettrico in C.C.) non è alimentato. Nella configurazione *b*) sono chiusi solo gli interruttori Q1 e Q4. Il morsetto sinistro del motore è collegato all'alimentazione  $V_s$  e il morsetto di destra a massa. Il motore essendo alimentato gira in un verso. Nell'ultima configurazione *c*) sono chiusi gli interruttori Q3 e Q2 mentre Q1 e Q4 sono aperti. Rispetto alla configurazione analizzata in *b*) la polarità della tensione applicata al motore è invertita quindi il motore gira nel verso opposto. In teoria i quattro interruttori possono essere aperti o chiusi indipendentemente dagli altri anche se in pratica è di fondamentale importanza evitare le configurazioni in cui sono chiusi contemporaneamente gli interruttori sullo stesso lato del ponte (Q1 e Q2 o Q3 e Q4). In questi casi, infatti, si otterrebbe un cortocircuito. Nella tabella 1 sono elencate tutte le combinazioni consentite:

Tabella 1

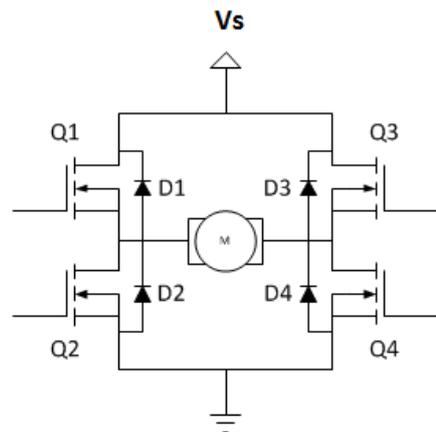
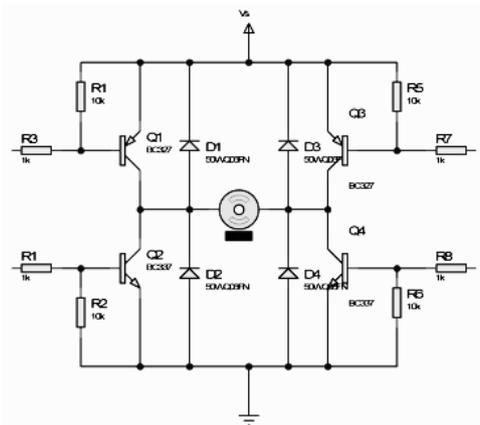
Q1	Q2	Q3	Q4
chiuso	aperto	aperto	aperto
chiuso	aperto	aperto	chiuso
chiuso	aperto	chiuso	aperto
aperto	chiuso	aperto	aperto
aperto	chiuso	aperto	chiuso
aperto	chiuso	chiuso	aperto
aperto	aperto	aperto	aperto
aperto	aperto	aperto	chiuso
aperto	aperto	chiuso	aperto

Questa tabella può essere ulteriormente “scremata” se si escludono le combinazioni (inutili) con un solo interruttore chiuso. Si ottiene così la tabella 2:

Tabella 2

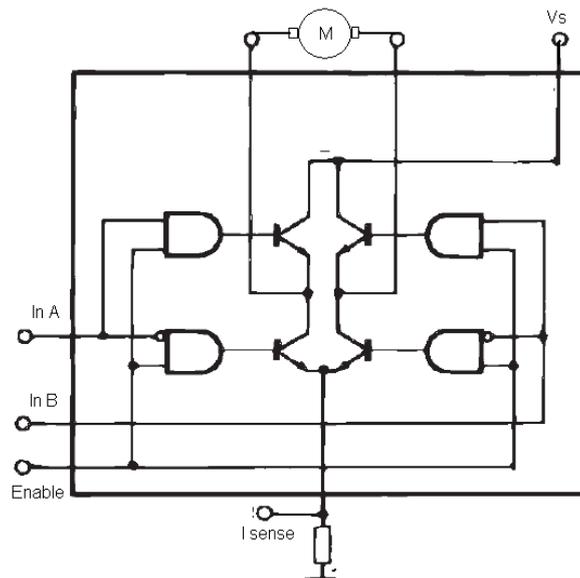
Q1	Q2	Q3	Q4
chiuso	aperto	aperto	chiuso
chiuso	aperto	chiuso	aperto
aperto	chiuso	aperto	chiuso
aperto	chiuso	chiuso	aperto
aperto	aperto	aperto	aperto

Nella pratica i quattro interruttori elettronici (Q1..Q4) sono normalmente costituiti da BJT, da MOSFET o IGBT.



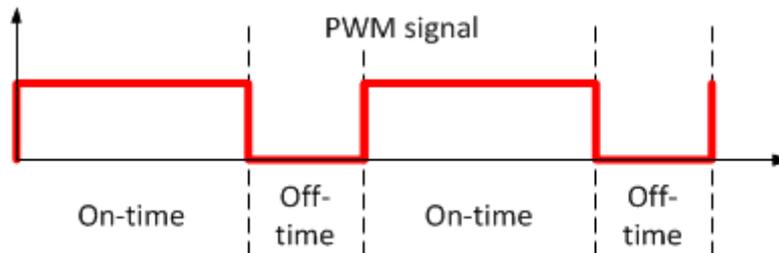
I quattro diodi (D1..D4) in parallelo agli switch sono denominati *diodi catch* e normalmente sono di tipo *Shottky*, diodi con tempi di commutazione brevissimi. La ragione del loro impiego sarà giustificata più avanti.

Esistono anche *ponti H* integrati dove i quattro elementi *switching* e la logica di controllo sono implementati in un unico *chip*:



## Modalità di pilotaggio

Il ponte H consente di comandare il motore solo in modalità *On/Off*. Nello stato *On* il motore è alimentato e gira (in un verso o nell'altro) alla massima velocità consentita dalla tensione  $V_s$ . Nello stato *Off* il motore non è alimentato. Nella maggior parte delle applicazioni pratiche è però richiesto una regolazione continua della velocità di rotazione. Questo risultato può essere ottenuto controllando i quattro elementi switching mediante una *modulazione a larghezza d'impulso* o PWM (*Pulse Width Modulation*). Un segnale PWM è un segnale digitale periodico con frequenza costante caratterizzato da due stati, di durata variabile, uno in cui il segnale è a livello logico alto (*On-time*) e l'altro in cui è a livello logico basso (*Off-time*):



Durante l'*On-time* il motore è alimentato e aumenta progressivamente la sua velocità, durante l'*Off-time* l'alimentazione è nulla e il motore, se prima girava, ora tende a frenare. A causa dell'elevata costante di tempo meccanica, la velocità di rotazione del motore non può seguire istantaneamente la tensione di alimentazione impulsiva generata dalla modulazione PWM. La velocità effettiva di rotazione sarà pertanto una media tra il suo andamento durante l'*On-time* e quello che si ottiene durante l'*Off-time*. È intuitivo dedurre che più lungo sarà il periodo dell'*On-time* più alta sarà la velocità media del motore. Si può pertanto scrivere che la tensione media di alimentazione del motore è proporzionale al valor medio del segnale PWM:

$$V_a = V_s \cdot \frac{On_{time}}{T_{PWM}} = V_s \cdot On_{time} \cdot f_{PWM}$$

dove  $T_{PWM}$  e  $f_{PWM}$  sono, rispettivamente, il periodo e la frequenza del segnale PWM.

Il rapporto tra *On-time* e periodo del segnale PWM ( $T_{PWM}$ ) è denominato *duty-cycle* (*DC*) e determina dunque la velocità di rotazione del motore:

$$DC = \frac{On_{time}}{T_{PWM}}$$

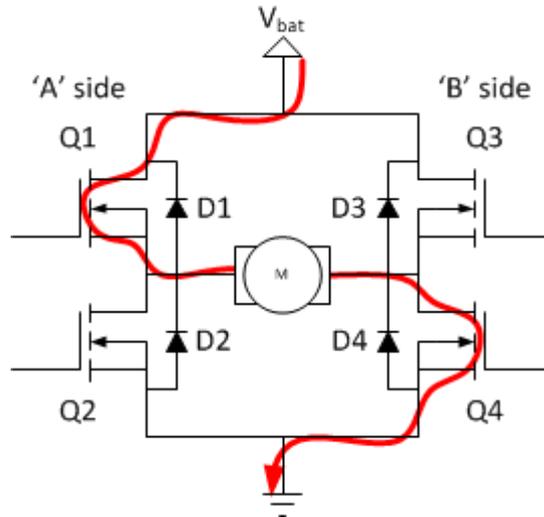
Solitamente il valore del *duty-cycle* è espresso in percentuale, un valore variabile tra 0% (*On-time* uguale a zero e *Off-time* coincidente con tutto il periodo) e il 100% (*On-time* coincidente con tutto il periodo e *Off-time* uguale a zero).

In conclusione, anche se il ponte H consente di pilotare il motore solo in modalità *On/Off*, la modulazione PWM consente di variarne la velocità con continuità.

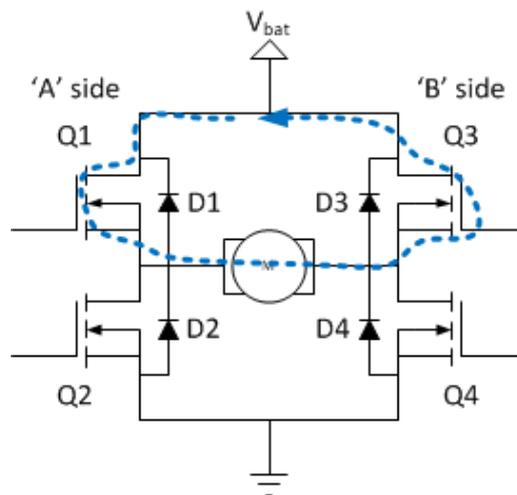
Ma il segnale PWM dove va applicato? Sono possibili diverse possibilità ciascuna delle quali prefigura una differente modalità di pilotaggio. Tali modalità dipendono anche da come sono pilotati gli switch durante gli stati *On* e *Off* del segnale PWM.

### Pilotaggio Sign-Magnitude

Se il segnale PWM pilota gli switch Q1 e Q4, durante l'*On-time* il motore risulta collegato tra l'alimentazione positiva e la massa, pertanto la corrente che lo attraversa tenderà a crescere, in questo esempio fluendo tra Q1 e Q4:



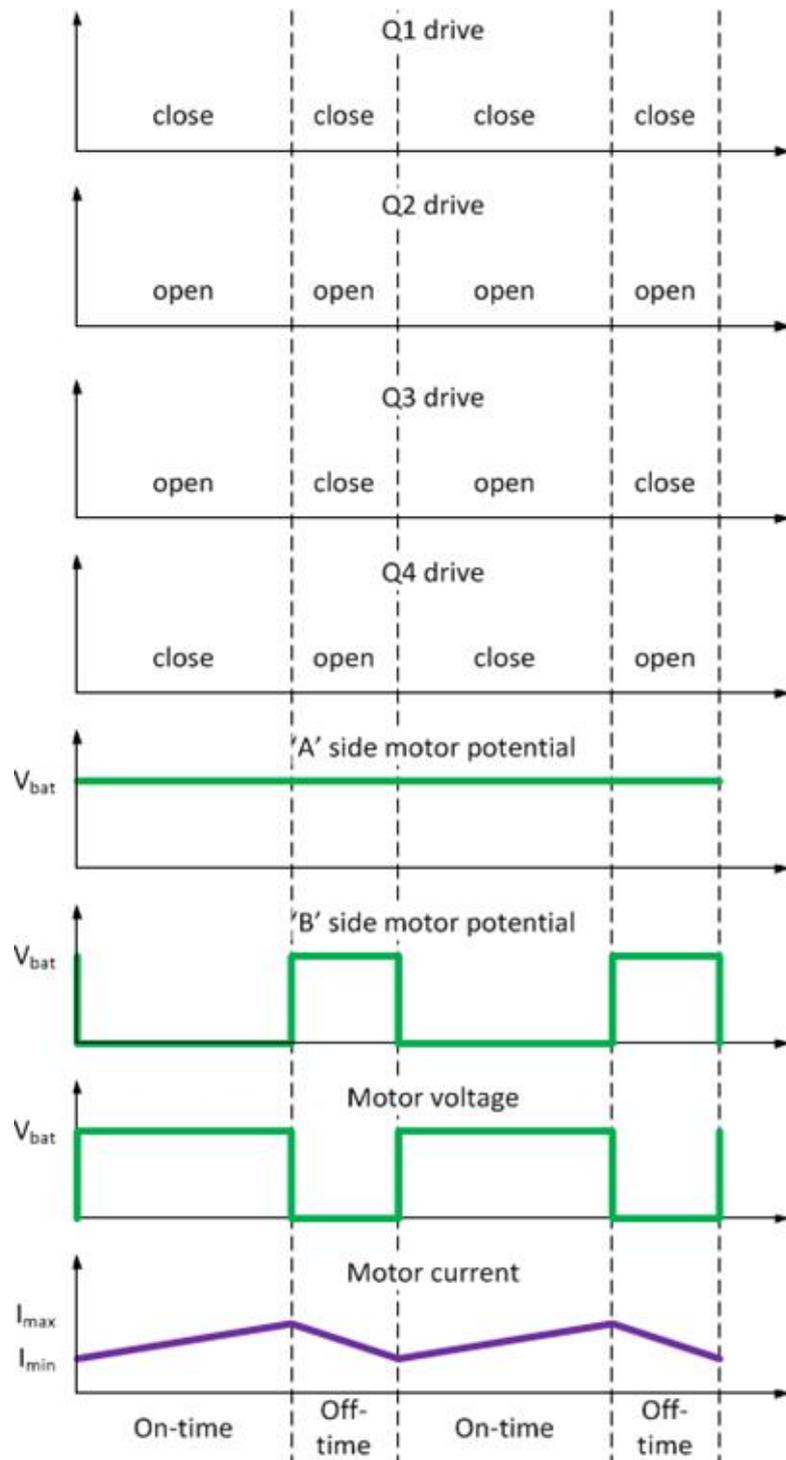
Quando il *ponte H* passa (quasi istantaneamente) da *On-time* a *Off-time* gli switch Q1 e Q4 si aprono. Tuttavia il motore costituisce un carico induttivo, di conseguenza la corrente non si può annullare istantaneamente, ma deve continuare a fluire in qualche modo fino a estinguersi. Occorre pertanto creare un nuovo circuito nel ponte H che consenta tale flusso. Questo percorso può essere realizzato, ad esempio, chiudendo Q1 e Q3 e aprendo Q2 e Q4:



In questo modo il *ponte H* interrompe la circolazione della corrente verso massa. Adesso entrambi i morsetti del motore risultano collegati all'alimentazione positiva (il motore è cortocircuitato) ma la corrente continua a circolare nello stesso verso. Se il periodo del segnale PWM è molto più piccolo della costante di tempo elettrica del motore e se la resistenza degli avvolgimenti è trascurabile, allora durante l'*On-time* la corrente crescerà linearmente, con una pendenza direttamente proporzionale alla velocità angolare del motore, infatti:

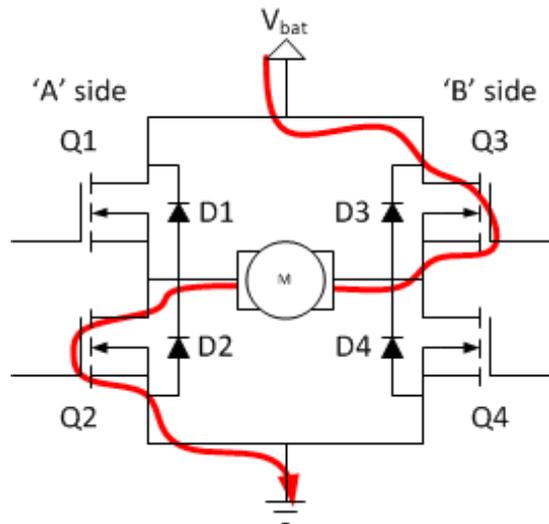
$$V_L = L \frac{di(t)}{dt} \Rightarrow \frac{di(t)}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{bat} - V_{FEM}}{L} = \frac{V_{bat} - K_m \cdot \omega}{L}$$

dove  $V_L$  è la tensione ai capi degli avvolgimenti,  $V_{FEM}$  è la forza controelettrica prodotta dal motore in rotazione, e  $K_m$  la costante di coppia. Poiché  $V_{bat}$  e  $K_m$  sono costanti, la pendenza della corrente risulterà direttamente proporzionale alla velocità del motore. Le tensioni e la corrente nel *ponte H* seguiranno questi andamenti:

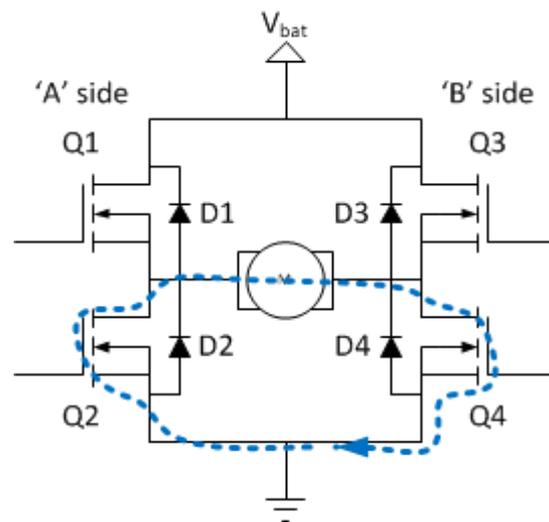


Durante l'*Off-time*, la  $V_{bat}$  è nulla e la tensione ai capi degli avvolgimenti del motore coincide con  $V_{FEM}$ . Poiché i terminali del motore risultano cortocircuitati se è possibile trascurare la sua resistenza interna la corrente decrescerà linearmente.

Se i transistor pilotati dal segnale PWM sono Q2 e Q3 l'alimentazione del motore risulta invertita rispetto al caso precedente e il motore gira nel verso opposto:



Anche la corrente avrà verso opposto. In questo caso durante la fase di spegnimento occorre disattivare Q3 e chiudere Q4:

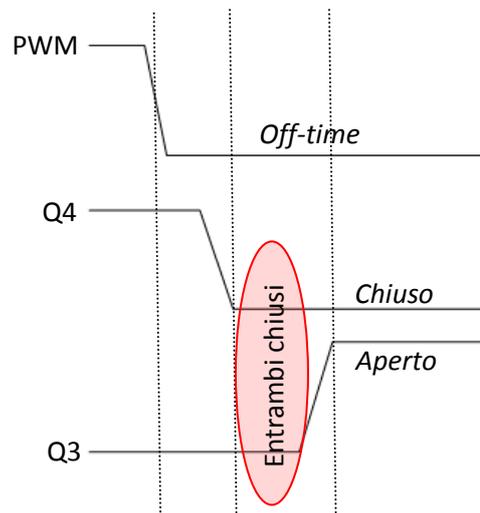


Riepilogando, nella modalità di pilotaggio *Sign-Magnitude* occorre applicare due segnali, il primo che controlla il verso di rotazione del motore (ovvero il suo segno, *Sign*), l'altro che ne regola la velocità (*Magnitude*) mediante la modulazione PWM. In pratica il segnale *Sign* determina a quale coppia di switch sarà applicato il segnale PWM.

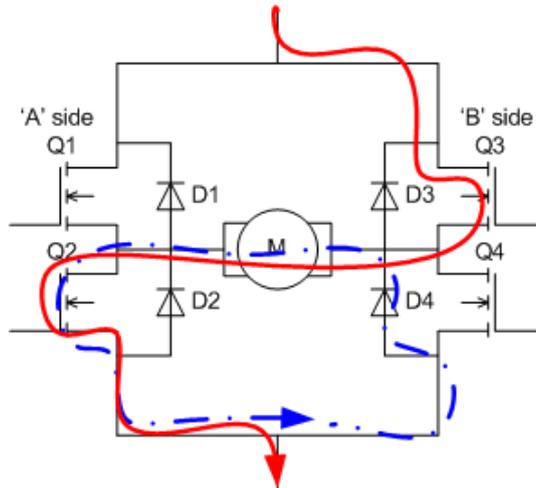
A questo punto viene da chiedersi qual è lo scopo dei *diodi catch*.

## Diodi catch

Si è visto che durante l'*Off-time*, la continuità del flusso di corrente nell'induttore (costituito dall'avvolgimento del rotore) è garantita dalla chiusura dei due switch nella parte alta o nella parte bassa del ponte H. Tuttavia poiché negli switch, a causa delle loro caratteristiche intrinseche, il tempo di chiusura (da *Off* a *On*) è inferiore a quello di apertura (da *On* a *Off*), esiste un brevissimo periodo di tempo in cui entrambi gli switch su uno stesso lato del ponte H risultano chiusi creando, pertanto, un momentaneo e sicuramente indesiderato cortocircuito (*shoot-through*). Per esempio, considerando il caso illustrato nelle due figure precedenti, quando il segnale PWM commuta da *On-time* a *Off-time*, lo switch Q4 si chiuderà prima che lo switch Q3 faccia in tempo ad aprirsi completamente:



In questa fase di transizione (nella figura rappresentata dalla zona rossa) entrambi gli switch si troveranno chiusi, causando un forte passaggio di corrente nel lato 'B' del ponte che, con ogni probabilità, ne provocherà il danneggiamento. Per evitare questo problema le logiche di controllo dei ponti H sono realizzate in modo da differire (seppur di poco) la chiusura degli switch sullo stesso lato (in questo caso di Q4). Tuttavia durante questo ritardo Q3 e Q4 risulteranno entrambi aperti, la corrente nel motore verrebbe inevitabilmente interrotta e si avrebbe di conseguenza un forte innalzamento della tensione a morsetti del motore. Questa *extratensione* porterà quasi sicuramente alla bruciatura di uno o più switch del ponte H. Ed è proprio per questo motivo che nei circuiti sono stati aggiunti i *diodi catch*. Il loro ruolo è quello di creare dei percorsi alternativi per far fluire la corrente del motore durante il periodo di tempo (seppur breve) in cui gli switch non lo consentono. Nella figura sottostante, facendo riferimento all'esempio precedente, è indicato il flusso di corrente nel motore durante l'*On-time* (in rosso). Il percorso contrassegnato in blu, invece, denota il percorso della corrente durante l'*Off-time*, prima che lo switch Q4 venga chiuso. Si può osservare che in questo caso la corrente circola nel *diodo catch* D4.



Ma allora perché non usare solo i diodi catch durante gli *Off-time* del PWM? La ragione principale è la dissipazione di calore. Uno switch chiuso (indipendentemente dalla sua tecnologia) ha una resistenza,  $R_s$ , molto bassa. La potenza dissipata  $P_s$  al passaggio della corrente  $I_a$  del motore è:

$$P_s = R_s \cdot I_a^2$$

Un diodo in conduzione presenta ai suoi capi una tensione,  $V_f$ , relativamente costante. La potenza dissipata  $P_d$  vale:

$$P_d = V_d \cdot I_a$$

La potenza  $P_s$  è inferiore a  $P_d$  se la corrente  $I_a$  è inferiore a  $I_a = \frac{V_d}{R_s}$ . Infatti se:

$$P_s < P_d \Rightarrow R_s \cdot I_a^2 < V_d \cdot I_a \Rightarrow R_s \cdot I_a < V_d \Rightarrow I_a < \frac{V_d}{R_s}$$

Per molti *diodi catch* la tensione  $V_f$  è compresa nell'intervallo  $0,7 \text{ V} \div 1 \text{ V}$  mentre una  $R_s$  tipica è dell'ordine dei  $100 \text{ m}\Omega$  anche se oggi non è difficile trovare MOSFET con  $R_s$  di  $10 \text{ m}\Omega$ . Se per esempio prendiamo un ponte H costituito da switch con  $R_s = 25 \text{ m}\Omega$  e da *diodi catch* con  $V_f = 0,8 \text{ V}$ , la corrente  $I_a$  massima per cui è preferibile scegliere gli switch per condurre la corrente durante l'*Off-time* vale:

$$I_a < \frac{V_d}{R_s} < \frac{0,8}{25 \cdot 10^{-3}} < 32 \text{ A}$$

Per correnti superiori è consigliabile far scorrere la corrente nei *diodi catch*.

### **Stato stazionario (steady state)**

Il ponte H è in uno stato stazionario se durante un ciclo del segnale PWM i valori medi della tensione e della corrente sono costanti. In questo stato il motore non accelera né decelera e la coppia prodotta è costante. Naturalmente il fatto che il valore medio della corrente rimanga costante non implica che il suo valore istantaneo non possa variare durante quel periodo. Questa variazione di ampiezza viene tecnicamente chiamata *ripple* (ondulazione). Se si assume come lineare la variazione della corrente in entrambi gli stati On e Off del segnale PWM, la variazione di corrente è data da:

$$I_{ripple} = \frac{(V_{bat} - V_{FEM})}{L} \cdot t_{ON} = \frac{V_{FEM}}{L} \cdot t_{OFF} \Rightarrow I_{ripple} = (V_{bat} - V_{FEM}) \cdot t_{ON} = V_{FEM} \cdot t_{OFF} \quad (1)$$

Ricavando  $V_{FEM}$  dalla (1) si ottiene:

$$V_{FEM} = V_{bat} \cdot \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = V_{bat} \cdot \frac{t_{ON}}{t_{PWM}} = V_{bat} \cdot DC \quad (2)$$

Poiché:

$$V_{FEM} = K_m \cdot \omega$$

si può affermare che la velocità media di rotazione del motore è proporzionale al *Duty Cycle* ( $DC$ ) del segnale PWM:

$$\omega = \frac{V_{FEM}}{K_m} = \frac{V_{bat}}{K_m} \cdot DC$$

## ***Bibliografia***

<http://modularcircuits.tantosonline.com/blog/articles/h-bridge-secrets/>