

新手特區 —

三相感應電動機起動 (4/5, 分5期刊登)

麥家聲

ksmak8888@yahoo.com.hk

http://www.ksmak-sir.com/

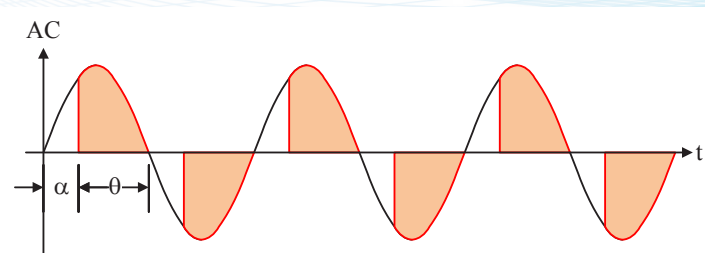
續上期

軟起動器起動方法

軟起動器 (Soft starter) 是一種集電動機軟起動、軟停車、輕載節能和多種保護功能於一身的電動機控制裝置，用於香港島某商業大廈食水泵系統的軟起動器實物如（圖：4.1）所示，它可以取代原有的星角形起動器。軟起動器也屬於降壓起動，主要採用串接於電源與被控電動機之間的三相反並聯晶閘管（以往多使用矽管，現今可能會用不同類型的電子元件，統稱晶閘管）作為交流調壓器，再以微處理器及訊號採集，保護環節構成控制器，只要改變晶閘管的觸發角「 α 」，如（圖：4.2）所示，就可調節晶閘管的導通角「 θ 」大小，來控制電路的輸出電壓，使電動機輸入電壓從零以預設函數關係逐漸上升，直至起動結束，電動機全電壓運行，即為軟起動。在整個起動過程中，軟起動器的輸出是一個平滑的升壓過程，更可具有限流功能，直到晶閘管全導通，電動機在額定電壓下工作。



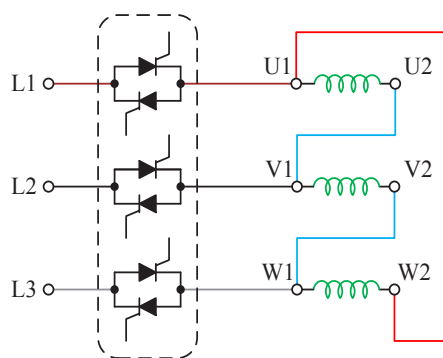
（圖：4.1）



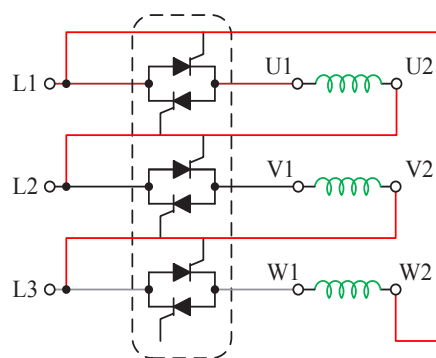
（圖：4.2）

在軟起動過程中，電動機起動轉矩逐漸增加，轉速也會逐漸增加，當軟起動結束，旁通軟起動器的接觸器閉合，使軟起動器退出運行電路。當電動機全壓運行至停車時，旁通電磁接觸器開路，軟起動器再次投入，這樣的安排可延長軟起動器的壽命，更使電網避免了諧波污染，還可減少軟起動器中的晶閘管發熱損耗。

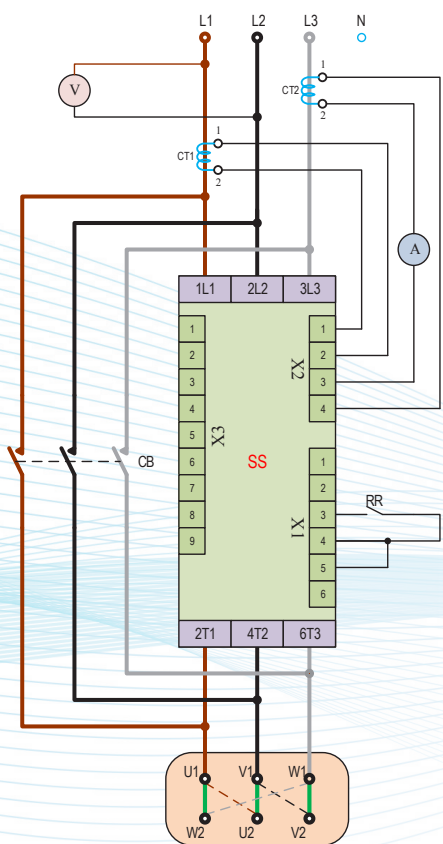
軟起動器與角形接法的電動機之連接方式可分為外連接式（三線電動機），如（圖：4.3）所示，晶閘管的電流為線電流；另外一種為內連接式（六線電動機），如（圖：4.4）所示，起動器串聯接入電動機三角形繞組中，晶閘管的電流為相電流，只為線電流的 $1/\sqrt{3}$ 電流作驅動，這樣可以使用較低額定值的軟起動器。



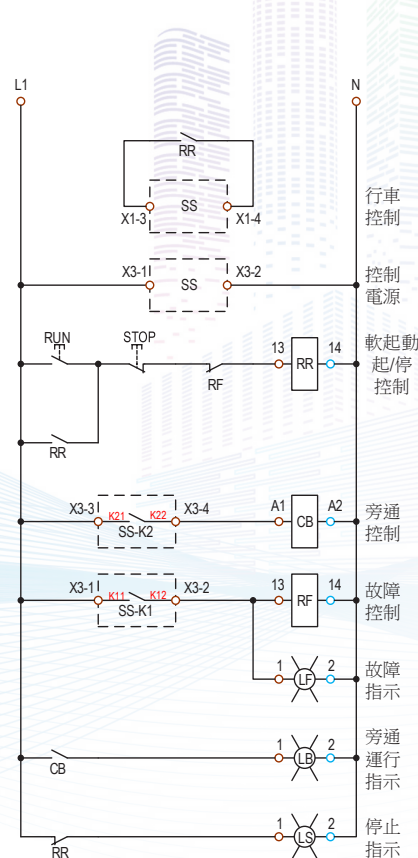
（圖：4.3）



（圖：4.4）



（圖：4.5）



（圖：4.6）

某廠出產的三線外連接式軟起動器主電路及控制電路分別如（圖：4.5）及（圖：4.6）所示，該軟起動器的相關端子功能或規格說明如（表：4.1）。這款軟起動器控制電路利用一個簡單的自保持電路令繼電器 RR 吸索，再經 RR 的常開觸點接至軟起動器 SS 的 X1-3 及 X1-4，軟起動器便能自動軟起動，軟起動完成後 CB 會自動吸索並旁路軟起動器並全壓運行，若 RR 停止吸索並復位，電動機便會停止運轉。

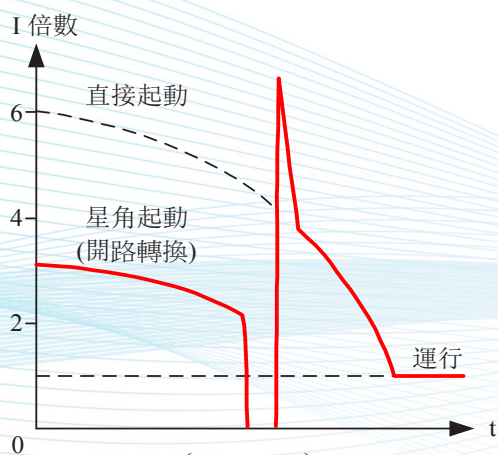
	端子號	端子名稱	功能或規格說明
主 電 路 及 控 制 回 路	1L1, 3L2, 5L3	交流電源輸入端子	接三相交流電源
	2L1, 4L2, 6L3	輸出至電動機端子	接三相感應電動機
	X1/1	模擬輸出（－）	4~20mA
	X1/2	模擬輸出（＋）	輸出負載阻抗 150~500Ω
	X1/3	COM	邏輯輸入公共端
	X1/4	外控起動端子 (RUN)	X1/3 與 X1/4（有電）短接＝起動
	X1/5	外控停止端子 (STOP)	X1/3 與 X1/5（無電）開路＝停止
	X1/6	可編程數字輸入口 D1	通過參數 C202 選擇
	X2/1	L1 相電流檢測輸入端子	經 CT 檢測 L1 相電流
	X2/2		
	X2/3	L3 相電流檢測輸入端子	經 CT 檢測 L3 相電流
	X2/4		
	X3/1	故障輸出繼電器 K1	輸出有效時 K11-K12 閉合 觸點容量 AC250V/5A，DC30V/5A
	X3/2		
	X3/3	旁路輸出繼電器 K2	輸出有效時 K21-K22 閉合 觸點容量 AC250V/5A，DC30V/5A
	X3/4		
	X3/5	可編程輸出繼電器 K3	輸出有效時 K31-K32 閉合 觸點容量 AC250V/5A，DC30V/5A
	X3/6		
	X3/7	保護導線 PE	接地
	X3/8	控制電源輸入端子 (220VAC)	AC110V~220V15%，50~60Hz
	X3/9		

（表：4.1）

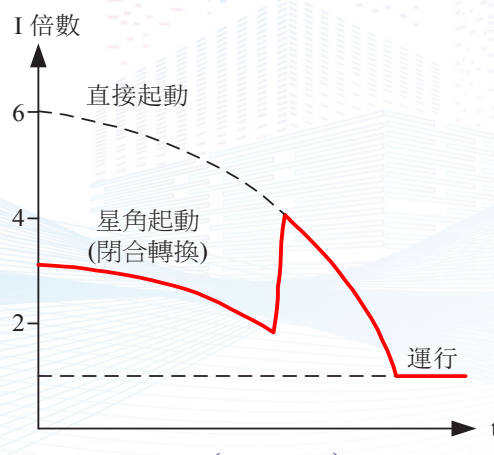
軟起動與傳統減壓起動分別

鼠籠式電動機傳統的降壓起動方式有 Y-Δ 起動、自耦減壓起動、電阻及電抗器起動等。這些起動方式都屬於有級減壓起動，存在明顯缺點，起動過程中會出現二次衝擊電流。軟起動與傳統降壓起動方式的不同之處包括：

1. 無衝擊電流—軟起動器在電動機起動時，通過逐漸增大晶閘管導通角，使電動機起動電流從零開始，線性上升至設定值；
2. 恆流起動—軟起動器可以引入電流閉環控制，使電動機在起動過程中保持恆流，確保電動機平穩起動；
3. 選擇起動電流—根據負載及電網情況作保護特性選擇，可自由地無級調整至最佳的起動電流；
4. 軟停車—電動機停機時，傳統的控制方式都是通過瞬間停電完成的，但有許多應用場合，並不允許電動機瞬間關機停車。例如：高層建築的水泵系統，如果瞬間停機，會產生巨大的「水錘」效應。為減低和防止水錘效應，需要電動機逐漸停機，稱為「軟停車」，若採用軟起動器能滿足這方面要求。在某些泵站中，應用軟停車技術更可避免泵站的「閥門」損壞，減少維修費用和維修工作量。軟起動器中的軟停車功能是當晶閘管在獲得停機指令後，從全導通逐漸地減小導通角，經過一定時間過渡到全關閉的過程，停車的時間也可根據實際需要調整。簡單來說是緩緩起動，緩緩停止。若沒有軟停車的需要，也可選擇以慣性自由停車，在軟起動器中作出設定。（註：水錘效應—水在管線中流動時，若閥門快速關閉，管內的水流由於物理慣性會往前推擠，管線內壓力上升讓水壓撞擊管壁，發出的聲音就會像重物落地聲，也會被誤會為人為噪音。水錘效應大小視水路之流量與管路兩頭落差，瞬間流量與水頭落差愈大，造成流速愈快，相對地水流的慣性動量愈大，產生水錘效應所造成之巨大壓力更大，巨大的水錘效應有可能造成設備如管道，甚至水泵遭到損壞。）
5. 軟起動器可實現輕載節能：鼠籠式非同步電動機是感性負載，在運行中，定子線圈繞組中的電流滯後於電壓。如電動機工作電壓不變，處於輕載時，功率因數較低，處於重載時，功率因數升高。軟起動器能實現在輕載時，通過降低電動機端電壓，提高功率因數，減少電動機的銅耗、鐵耗，達到輕載節能之目的；負載重時，則提高電動機端電壓，確保電動機正常運行。另外，軟起動可令電壓逐漸升至最大值，可使消耗的能量更少。



(圖：4.7)



(圖：4.8)

星角形起動器可算是最常用的起動器，可降低起動期間的電流和轉矩，但起動器不可調節，因此如果轉矩下降幅度太大可能令電動機無法順利起動。此外，由星形切換至三角形時會

產生浪湧電流。由於星角形起動器的普及與價廉，建議下列情況仍可採用星角形起動器：

- 負載很小時；
- 僅需要降低起動加速時電流；
- 尖峰電流在可接受範圍時。星角起動「開路轉換」電流特性如（圖：4.7）所示；但也可考慮採用「閉合轉換」起動，其起動電流特性如（圖：4.8）。

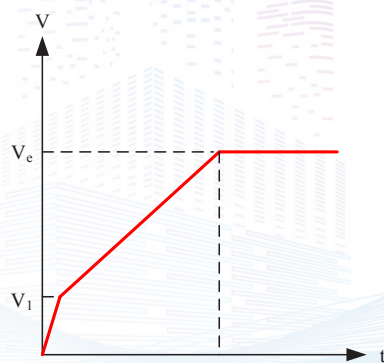
由於軟起動器的獨特性能及表現，最適合以下的應用場合：離心泵，壓縮機，風扇／鼓風機／抽氣機，攪拌機，破碎機，起重機及傳送帶等。

軟起動方式

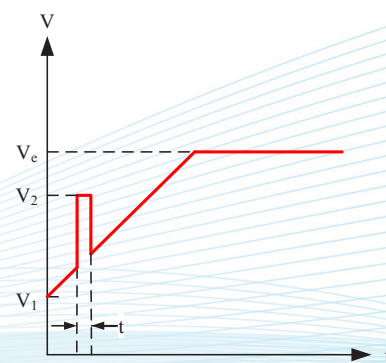
軟起動器根據各廠按市場需要而自行設計不同產品，可能有不同的專利，各廠的產品特性雖然十分相似，也可能有不同的名稱。大部分產品都可根據不同負載實際需要，按軟起動器說明指引來作出設定，常用有下列的起動方式：

1. 斜坡升壓軟起動

斜坡升壓軟起動方式最簡單，它不具備電流閉環控制，僅調整晶閘管導通角，使之與時間成一定函數關係增加，電壓特性曲線如（圖：4.9）所示。其缺點是由於不限制電流，在電動機起動過程中，有時可能會產生較大的衝擊電流使晶閘管損壞，對電網影響較大，實際較少應用。啟動時，若電動機電流不大於額定電流的 400%，軟起動器的輸出電壓將迅速上升到 V_1 ，稱為初始電壓，然後輸出電壓會逐漸以斜坡上升到額定電壓 V_e ，以額定轉速運行，然後旁通電磁接觸器閉合，起動程序結束。這種起動方式適用於需要電動機平穩起動的場合。



（圖：4.9）



（圖：4.10）

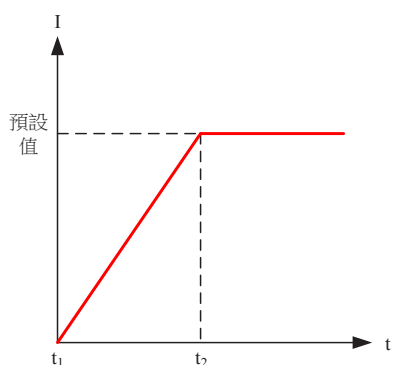
2. 突跳軟起動

突跳軟起動控制電動機的電壓，會以斜坡式慢慢上升。惟起動時會突然將電壓增加而令電動機快速起動，這段突然增加電壓的時間 t 稱為突跳時間，然後電壓回復電壓斜坡起動方式曲線上升，轉速隨即上升直至額定轉速，電壓特性曲線如（圖：4.10）所示，此起動方法適用於

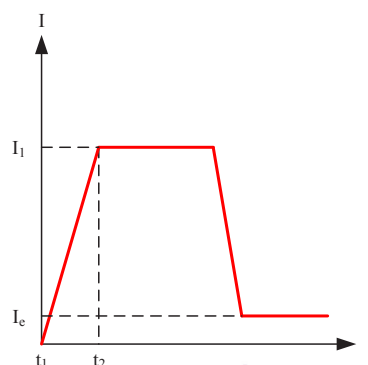
起動大慣性的負載。

3. 電流斜坡軟起動

電流斜坡軟起動方式是在電動機起動的初始階段使起動電流逐漸增加，電流特性曲線如（圖：4.11）所示， t_1 至 t_2 為斜坡變化階段，當電流達到預先所設定的值後保持恆定，直至起動完畢。起動過程中，電流上升變化的速率是可以根據電動機負載大小調整其設定。電流上升速率大，則起動轉矩大，起動時間短。這種起動方式是應用最多的起動方式，尤其適用於風機、泵類負載的起動。



（圖：4.11）



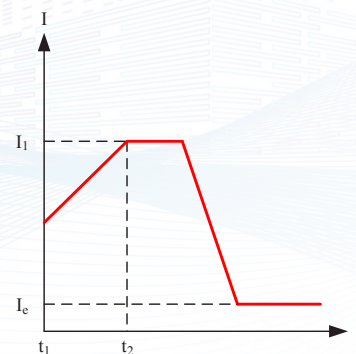
（圖：4.12）

4. 限流軟起動

限流軟起動的電流特性曲線如（圖：4.12）所示，它與電流斜坡軟起動相似。 I_1 為起動限制電流預設值，在起動過程中限制其起動電流不可超過 I_1 。起動時，軟起動器控制輸出電壓迅速上升，使起動電流逐漸增加，直至電動機電流達到 I_1 值保持恆流。當電動機運行到額定轉速時，便將輸出電流迅速下調，降至電動機額定電流 I_e 值，此時旁通電磁接觸器接通。這種起動方式的優點是起動電流小，且可按需要調整。惟當電動機負載過輕或 I_1 設定值過高時，起動最大電流可能達不到 I_1 值，這種起動方式適合對起動電流限制要求嚴格的場合，尤其適用於風機、泵類負載的起動。

5. 階躍起動

階躍起動方式與電流斜坡軟起動相似，起動時以最短時間使起動電流迅速達到設定值 I_1 ，電流特性曲線如（圖：4.13）所示。階躍起動通過調節起動電流設定值，可以達到快速起動效果，也適用於較大起動轉矩的重型負載的起動，並且可以減少起動時間。

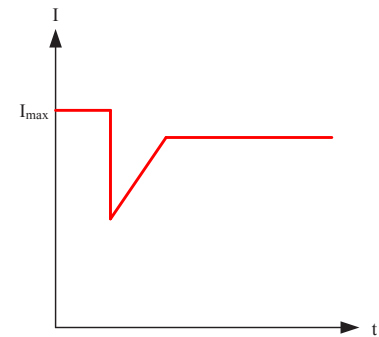


（圖：4.13）

6. 步進模式起動

步進模式軟起動又稱脈衝衝擊起動，它與突跳軟起動相似。在起動時，先讓晶閘管在極短

時間內，供給電動機一定時間的較高固定電壓，用作克服電動機大負載的靜摩擦力而使電動機起動，電流 I_{max} 導通一段時間後回落，然後採用限流起動或電壓斜坡起動方式按原設定值線性上升，電流特性曲線如（圖：4.14）所示。此方法適用於重負載場合，如果負載的靜摩擦力很大而無法起動，才選用此方法，否則應避免採用此方法，以減少不必要的大電流衝擊。



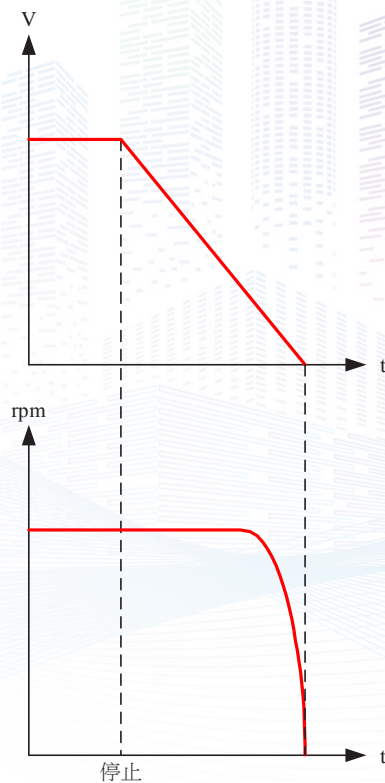
（圖：4.14）

軟起動器停止模式

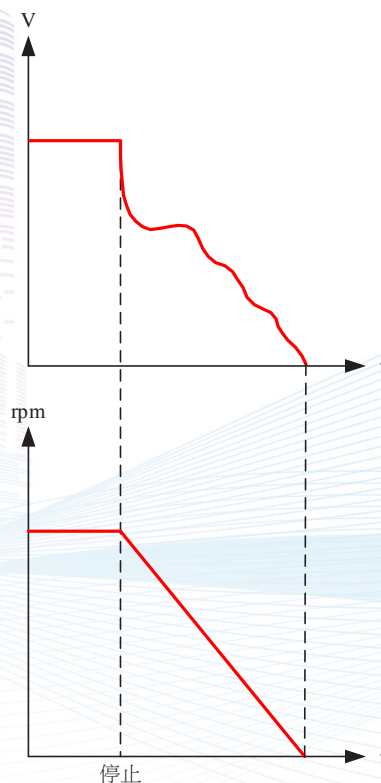
應用軟起動器時，可根據負載的實際需要，在軟起動器設定不同的停車模式，包括自由停止及軟停止，從而獲得更理想的停車效果。

自由停止 (Free stop)：採用此方式停止電動機時（停車），軟起動器收到停車訊號後，將切斷與旁通電磁接觸器的連接，並停止晶閘管的輸出電壓，電動機會按其慣性逐漸停止。一般情況下，如果該設備不需要軟停止模式，應選擇自由停止模式，以延長軟起動器的使用壽命。

軟停止 (Soft stop)：使用此方式停止電動機時，軟起動器會控制電動機的電源，從旁通電磁接觸器轉移到軟起動器上，軟起動器的輸出電壓將逐漸降低，從而使電動機運轉速度可平穩降低，避免機械衝擊，輸出結束電壓與起動初始電壓相同。軟停止模式可以減少或消除水泵等負載設備的水錘效應，有效增加負載慣性，延長煞車時間。



（圖：4.15）



（圖：4.16）

常用的軟停止方法有電壓斜坡及轉矩斜坡兩種。使用電壓斜坡作為軟停車時，電動機的電壓會逐漸以線性減少，從而使電動機慢慢停止。由於轉矩與電壓和電流有關，所以轉矩（轉速）曲線並不一定與電壓曲線一樣呈線性減少，電壓及轉矩特性曲線如（圖：4.15）所示。若使用轉矩斜坡進行軟停車，電動機的電壓將按時被控制，轉矩會按照預設的最佳曲線逐漸減少，從而使電動機停止，電壓及轉矩特性曲線如（圖：4.16）所示。轉矩斜坡相比電壓斜坡軟停車，轉矩斜

波軟停車更能體現軟停車特性，所以特別適用於水泵應用場合，因為水泵的突然停止會造成水錘效應和過大的管道壓力。

軟起動器的保護功能

一般的軟起動器已內置下列的保護功能，使操作及維護更方便：

1. 超載保護功能—軟起動器附有電流控制系統，因而可隨時檢測電動機電流的變化狀況。通過增加超載電流的設定和反時限控制模式，實現了超載保護功能，使電動機超載時，關斷晶閘管並發出警報訊號；
2. 缺相保護功能—工作時，軟起動器隨時檢測三相線電流的變化，一旦發生斷流，即可作出缺相保護反應；
3. 過熱保護功能—通過軟起動器內部熱繼電器檢測晶閘管散熱器的溫度，一旦散熱器溫度超過允許值後自動關斷晶閘管，並發出警報訊號；
4. 欠載保護—欠載保護也就是欠電流保護，電動機在全壓狀態下工作時，軟起動器的欠載保護功能實時監測，若電動機電流突然下降，超出欠載脫扣的設定範圍，且超過脫扣設定的延時後，電動機停止運轉；
5. 其他功能—通過電子電路的組合，還可在系統中實現其他種類的聯鎖保護。

軟起動器的選擇

軟起動器主要按照電動機的電壓，電流來選擇。接著就是負載類型，一般水泵、風機、壓縮機等都可以選擇通用的普通軟起動器。破碎機，攪拌機，運輸帶等一些重載機械就需要選擇初始轉矩大的軟起動器。

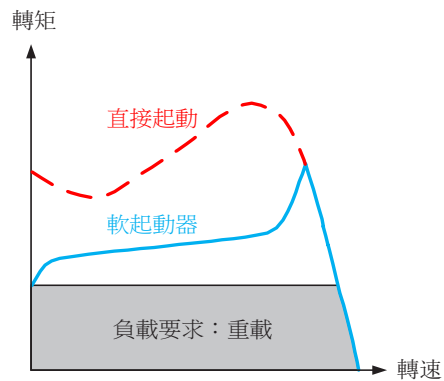
軟起動器是全轉速型起動器，通過可控制電流、轉矩和加速度的晶閘管來控制電動機電壓，實現三相電動機加速、減速並對電動機進行有效保護。此外，使用時可根據負載需求自由調節各種變數，因此能夠在各種應用中最大限度降低起動電流。軟起動器應用環境如下：

- 電動機需要全速運轉；
- 需要降低起動電流以保護電網；
- 需要降低起動轉矩以降低維護成本；
- 需要既能控制電動機又能有效保護電動機的完整起動解決方案。

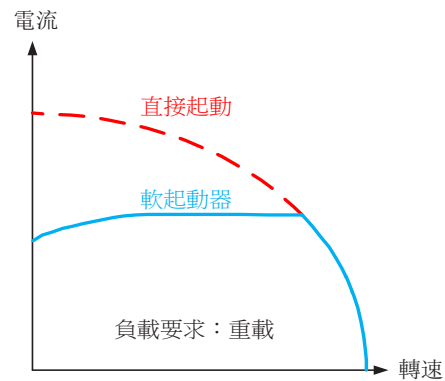
軟起動器可以調節輸出電壓從而實現所需電動機起動特性。例如：負載為重載時，電動機需要的起動轉矩便較高，所以需輸出高的電壓從而獲得較大的起動電流，如（圖：4.17）及（圖：4.18）所示的特性曲線；相反負載為輕載時，只需輸出較低的電壓及小電流，這個較低的起動轉矩便可使電動機起動，如（圖：4.19）及（圖：4.20）所示的特性曲線。此外，較小的加速度也有助於減少機械性磨損。

優點：

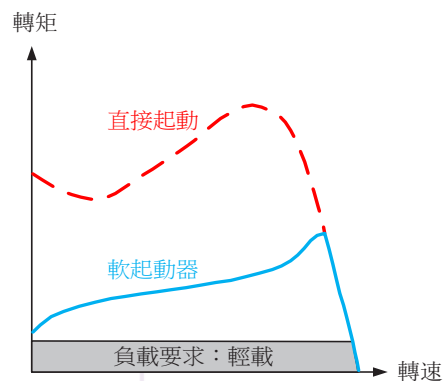
- 低起動電流，防止電湧，起動過程中不會引起電壓驟降，避免電機過熱，延長了電機的使



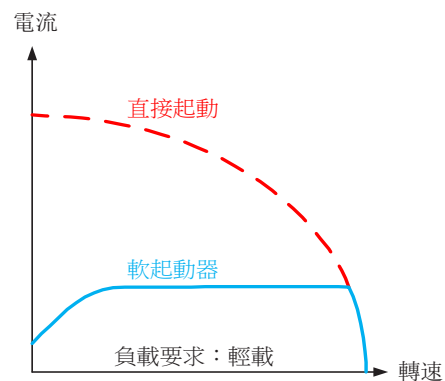
(圖：4.17)



(圖：4.18)



(圖：4.19)



(圖：4.20)

用壽命：

- 適用於所有類型的感應電動機，可實現非常平滑的起動，但起動轉矩可滿足需求，更可以控制電機起動時的加速度和停止時的減速；
- 可用於多次起動的場合，增加了電機在特定時間內的起動次數；
- 支援軟停止；
- 與其他起動器（如自耦式變壓器起動）相比，它的體積非常小，佔用空間較小；
- 內置電動機保護功能。

缺點：

- 降低了與輸入電流相對應的輸入電壓，而輸入電流與感應電動機的起動轉矩成正比，因此降低了起動轉矩，不適用於重載起動的大型電動機；
- 無速度調節控制（需要速度調節時可使用變頻器），僅適用於起動和停止電動機；
- 軟起動器的電子設備會產生諧波，污染電源，需要設法解決；
- 與常用簡單的直接起動器及星角起動器相比，投資成本較高，價格昂貴，進行維護及排故，也需要較專業的人員。

軟起動器的常見故障

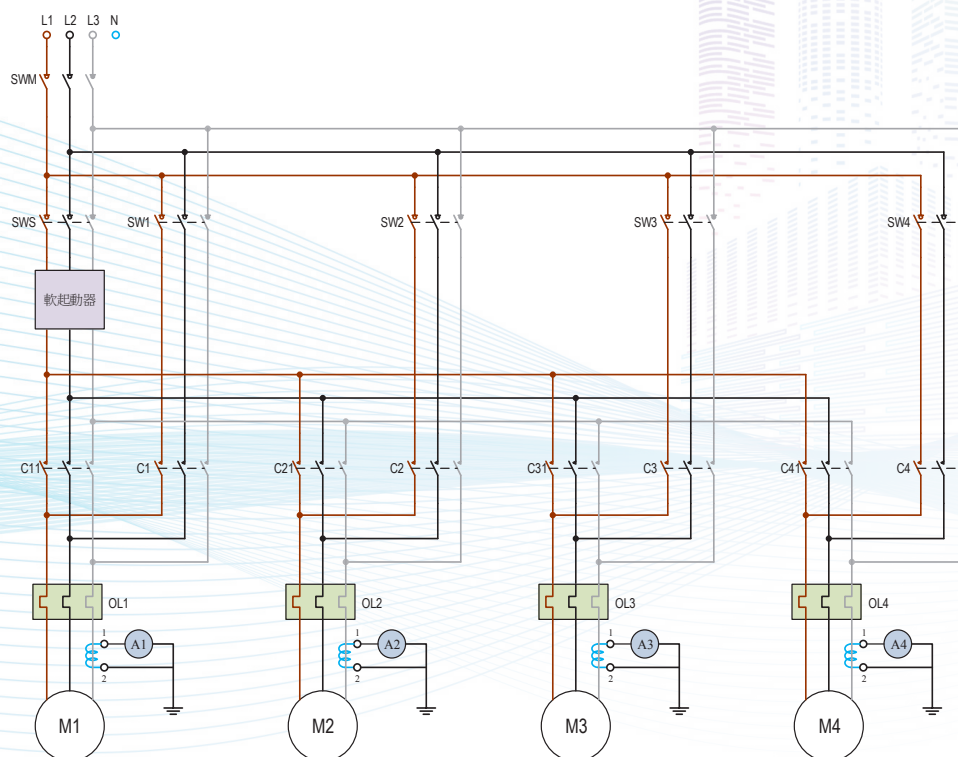
雖然軟起動器效果良好，十分可靠，一般處於優質的工作狀態，但也有可能發生故障，根

據國內的統計資料，軟起動器的常見故障包括：

1. 電動機不能起動—原因大致可分兩種：（一）6 隻晶閘管的其中一隻未能觸發或不導通，此時一相電路通過的是半波直流，電動機的兩相繞組通過之直流，更會對電動機起了制動作用，不僅電動機不能起動，嚴重的還會燒毀電動機繞組或晶閘管。（二）軟起動器起動參數或起動曲線不合適造成電動機不能起動。前者在使用過程中可能會發生，但機率很低；後者多發生在第一次行車調試，惟調試完成後便不會出現。
2. 晶閘管燒毀—晶閘管擊穿或爆炸，主要問題出現在較差的餅式晶閘管安裝工藝上。
3. 控制器燒毀—控制器燒毀是最嚴重的故障，多出現在控制器的電源，觸發電路及輸入電路三個部分。
4. 軟起動器的誤動作—電動機在運行的狀態下，因軟起動器受干擾而引致停機；在停止狀態下，因軟起動器受干擾而起動。
5. 軟啟動器內部插接件接觸不良—因內部插接件接觸不良，未能接通某些電路。

軟起動器一拖多台

在一些大型的電動機控制系統，如以多個水泵的抽水控制場合，假如應用時是不需要多個水泵同時起動，只需分別起動便可，這時可採用軟起動器「一拖多台」的方法，即只用單一個軟起動器，透過控制電路，使軟起動器於不同時間來起動不同的電動機水泵，便可節省設備投資、降低成本、更有效利用控制櫃的佔地面積及大小。一拖多台以單台軟起動器為控制主體，再配合控制相應台數電動機的旁通電磁接觸器。水泵一拖四台主電路如（圖：4.21）所示，起



（圖：4.21）

動控制工作原理如下：

- M1 運作—可用繼電器或 PLC 作自動控制電路，使電磁接觸器 C11 吸索，軟起動器接通 M1 電動機，進行軟起動，完成軟起動後用相應旁通電磁接觸器 C1 使 M1 電動機直通接到電網，電磁接觸器 C11 釋放彈出復位，與軟起動器隔離。需要軟停車時，控制電路令電磁接觸器 C11 吸索，軟起動器再接通 M1 電動機，電磁接觸器 C1 釋放彈出復位，軟起動器控制 M1 作軟停車，完成軟停車後，電磁接觸器 C11 釋放彈出復位，M1 電動機完全停止供電。電磁接觸器 C11 在軟起動及軟停車都需要吸索接通軟起動器，功能上可稱為起動 / 停車電磁接觸器；
- M2 運作—M2 工作原理與 M1 相同，相應的起動 / 停車電磁接觸器 =C21，旁通電磁接觸器 =C2，輸出電動機 =M2；
- M3 運作—M3 工作原理與 M1 相同，相應的起動 / 停車電磁接觸器 =C31，旁通電磁接觸器 =C3，輸出電動機 =M3；
- M4 運作—M4 工作原理與 M1 相同，相應的起動 / 停車電磁接觸器 =C41，旁通電磁接觸器 =C4，輸出電動機 =M4。

以上的一拖四台水泵系統，只採用一部軟起動器，以控制四台電動機的軟起動及軟停車，所以控制系統的電路必須確保任何時間，只會給予一台電動機作軟起動或軟停車，惟需要緊急停車時，緊急自由停止可容許多台同時停車。由於內置於控制櫃的軟起動器一般為自然風進行冷卻，而每次軟起動或軟停車都會產生一定熱量，因此每台電動機的軟起動或軟停車間隔時間應設置大於 5 分鐘，以保證在整個軟起動或軟停車過程中不會出現過大熱量，從而提高產品的可靠性。

- ◆ YouTube 影片 — What is a Soft Starter? (For Absolute Beginners)
— 英語—英字幕 (7:56)
<https://www.youtube.com/watch?v=6X71RZWvOvc>
- ◆ YouTube 影片 — Soft Starters vs. Drives — 英語—英字幕 (2:29)
<https://www.youtube.com/watch?v=kXOLKxelobc>
- ◆ YouTube 影片 — Difference between Variable Frequency Drives-VFD and Soft Starter — 英語—英字幕 (1:44)
<https://www.youtube.com/watch?v=nj6ubbsZVka>
- ◆ YouTube 影片 — What is the Difference between VFD and Sof Starter?
— 英語—英字幕 (7:30)
https://www.youtube.com/watch?v=_ZztDN5XX5o
- ◆ YouTube 影片 — Variable Frequency Drives Explained- VFD Basics IGBT inverter — 英語—英字幕 (15:17)
<https://www.youtube.com/watch?v=yEPe7RDtkgo> 



未完，下期再續。