

同步機概論

(Introductory Synchronous Machines)

清大電機系：廖聰明

交流機之分類：

■ 相數 (Phase): Single-phase and three-phase.

(1) Synchronous machine (SM):

◎ Salient-pole(凸極式)：Low speed (如水力發電機)

◎ Non-salient-pole (隱極式) or cylindrical-type (圓柱式)：
High speed (如火力發電機)

☒ 直流無刷馬達 (Brushless DC Motor, *BDCM*) :

為永磁式同步馬達，但具有轉子位置感測裝置及變頻器，以決定子電樞繞組之激磁，可使定子產生之磁場與轉子之磁場保持垂直，具有如同直流馬達般之轉矩產生性能。

(2) Induction motor (IM):

- ◎ Wound rotor (or slip-ring) (R_r can be changed)
- ◎ Squirrel cage rotor (R_r is fixed)

2. 結構 (Construction):

◎ Stator :

SM 與 IM 之電樞繞組相同，放置於Stator，定子繞組如為三相平衡繞組，其上流有三相平衡交流電流時，可產生旋轉磁場。

◎ Rotor :

SM：較大容量之同步機，轉子上放置磁場繞組，通以直流電以產生固定之磁場。容量較小之同步馬達，如直流無刷馬達，轉子上沒有磁場繞組而放置永久磁鐵。

感應馬達 (IM) :

- **Wound-rotor** : 轉子上放置繞組經由炭刷-滑環組，在外串加電阻或短接，以調控啟動及運轉速度。
- **Squirrel cage rotor** : 在轉子槽中放置金屬條，於兩端短接，金屬條為**斜置**(Skew)，以等效分佈繞組作用，使轉矩平順，降低噪音。

3. 感應馬達之分類及結構

■ 三相 *IM* : 鼠籠式、繞線式。

■ 單相 *IM* : 全為鼠籠式

分相啟動式、電容啟動式、電容運轉式、
電容啟動/運轉式、蔽極式、其他。

(1)、繞線式：

轉子放有三相平衡繞組，經由炭刷滑環接到外面之電阻，
改變外加電阻值，可以得所需啟動特性及並可改變速度。

(2)、鼠籠式：

轉子為一些如圖示之短路銅條，無法如繞線式改變轉子繞
組之電阻。可密封、少維護、體積小。銅條一般為斜置，
以減少運轉噪音及促進運轉之平滑。依金屬條之形狀及單
層或雙層，可有不同轉矩特性之鼠籠式感應馬達：

class A, B, C, D。

3. 同步機之應用:

- 同步發電機: 用於發電廠由機械能帶動，藉由電磁轉換產生定頻定壓之交流電。
- 同步電動機: 大容量之同步電動機用於工廠之定速驅動。小容量之永磁同步電動機用於週邊裝置之驅動，如：散熱扇、磁碟機、雷射印表機、
、
、
等。
- 線性同步電動機: 用於高速大眾運輸工具。
- ☒ 同步機之激磁控制: 可藉由激磁控制使其功因為越前或落後。
- ☒ 同步電容機: 用以從事功因補償控制之無載同步電動機。

台灣輕軌電車性能及規範

類別	分類	特性或規格
營運條件	營運路線	台鐵支線或平面街道
	軌距	1067mm
	最小轉彎半徑	25m
	架空線電壓	750 VDC ←
	使用年限	不得低於30年
全車特性	車輛型號	輕軌二號(TLRV-II)
	聯結方式	以聯結關節連接可雙向行駛
	全長×寬×高	28 m×2.6 m×3.5 m
	低底盤比率	70%
	載客容量	200人
	最大行車速度	70km/hr
	最大加速度	1.3m/sec ²
	全車重量	空重32.4噸、總重46.4噸
車體	材料	鋁合金、強化玻璃纖維
	車門數目	8扇雙門板車門，具感知器
轉向架	型式	Bo'2'Bo'
	軸距	1,700mm
牽引馬達	馬達型式	三相交流感應馬達
	輸出功率	4×120 kW, 80Hz, 640V ←

台灣自強號： EMU-100的基本資料

製造廠商	英國GEC公司
製造年份	1979
單組配置	(南端)EP-EM-ET-ET-ED(北端)
最高車速	120km/h
出力	1275 kw/1710 hp
單組全長	101.8公尺
車輛編組	EP-駕駛動力車 EM-馬達客車 ET-拖車*2 ED-駕駛拖車
保安裝置	自動警告/自動停車輔助系統 ATW/ATS 警醒裝置 運轉專用無線電話
軔機系統	西屋西碼式氣軔系統
座位	EP-44位 EM-52位 ET-52位 ED-44位
現有車數	63輛13組(資料有誤,其實更少)
編組運用	最多可三組重作總控制運轉



INFORMATION ABOUT HIGH SPEED TRAINS

trains running at 200km/h = 125mph and faster



USA: Amtrak's Acela (245 km/h = 150mph)

Sweden: Arlanda Express (200km/h = 125mph)

Spain: Renfe's Alaris Tilting Trains (220 km/h = 135 mph)

Sweden: x2000 (200 km/h = 125 mph)

USA: California High Speed (320 km/h = 200 mph)

Italy: High Speed Train ETR 500 (300 km/h = 190 mph)

Finland: RHK's Pendolino (220 km/h = 135 mph)

Florida Overland Express FOX (320km/h = 200mph)

Norway: The Gardermoen line (210 km/h = 130 mph)

Germany: InterCity Express ICE (300 km/h = 190 mph)

Australia: Queensland Rail's High Speed Line

Japan: JR Central's Shinkansen (270km/h = 170mph)

Australia: Speedrail High Speed Railway (320km/h = 200mph)

Switzerland: Tilting High Speed Trains (200 km/h = 125 mph)

Taiwan: High Speed Railway Administration (300 km/h = 186 mph)

France: SNCF's TGV Train Grande Vitesse (300 km/h = 186 mph)

South Korea: Korean National Railroad's TGV (300 km/h = 186 mph)

Benelux/German/France: Thalys PBKA (300 km/h = 186 mph)

UK: Railtrack's West Coast Main Line (225 km/h = 135 mph)

China: High Speed (250 km/h = 155 mph)

■ Series 500



In Service : March 1997

Operator : West Japan Railway Company

Running at a maximum speed of 300km/h, it features a number of new kinds of technology to ensure high-speed performance, a more comfortable ride, less noise, and minimized pressure changes inside the cars when the train enters a tunnel. The carbody is designed for maximum passenger comfort and to facilitate train operation and maintenance.

Gauge : 1,435mm

Electric system : 25kV ac, 60Hz

Train formation : 16M

Train ratings(continuous) : 64 x 285kW

Carbody : Aluminum-alloy construction

Bogie and driving system : Bolsterless bogie, air suspension, gear coupling drive

Traction Control system : PWM converter / VVVF inverter control with regenerative braking

Maximum service speed : 300km/h

2. 同步旋轉磁場

⊗ $m \neq 2$

P 極 m 相交流機：m 個電樞繞組在空間互差 $360^\circ / m$ 電氣角度(機械角度 = $360^\circ(2/P)/m$) 放置，通以互差 $360^\circ / m$ 電氣角度之 m 相平衡電流。同步旋轉磁場之速度為： $120f / P$ (rpm)

⊗ $m = 2$ ：P 極 2 相交流機

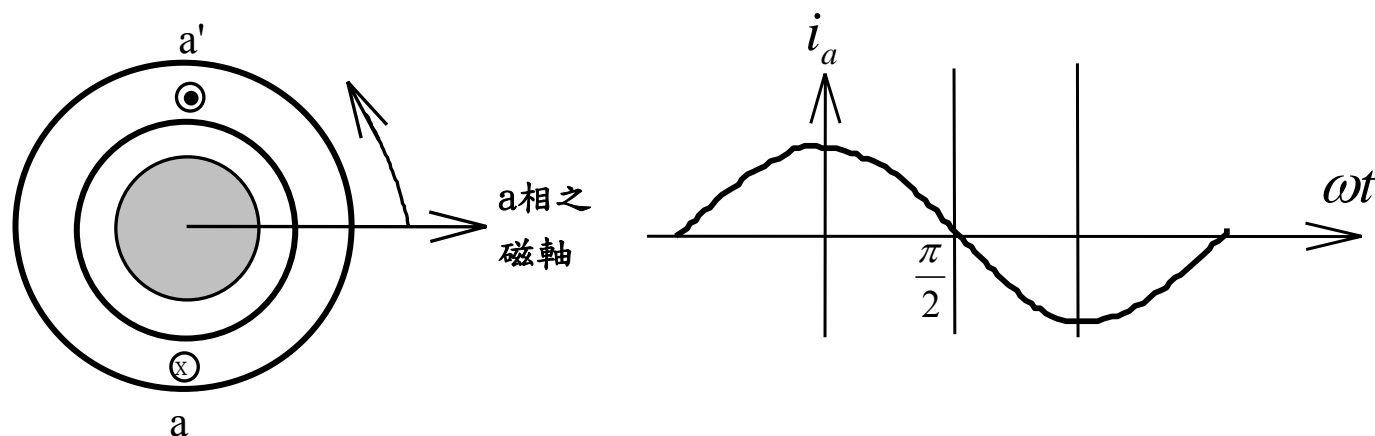
$N_a = N_m$ ：2 電樞繞組在空間互差 90° 電氣角度放置，通以互差 90° 電氣角度之 2 相平衡電流

$$i_m(t) = I \cos \omega t, i_a(t) = I \sin \omega t$$

$N_a \neq N_m$ ：2 電樞繞組在空間互差 90° 電氣角度放置，通以互差 90° 電氣角度之 2 相不平衡電流，使 $N_m i_m(t)$ 與 $N_a i_a(t)$ 保持兩相安匝平衡，亦即：

$$N_m i_m(t) = N_m I_m \cos \omega t, N_a i_a(t) = N_a I_a \sin \omega t, \\ N_m I_m = N_a I_a$$

單相線圈(m=1)之旋轉磁場



$$F(\theta, t) = N i_a \cos \theta = N I_m \cos \omega t \cos \theta =$$

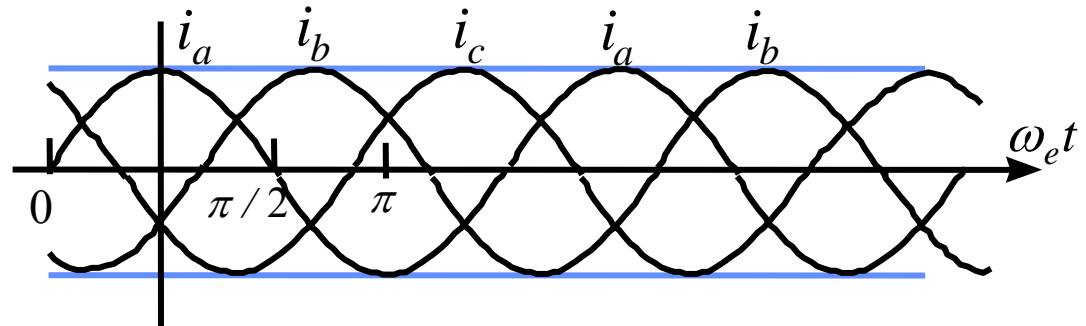
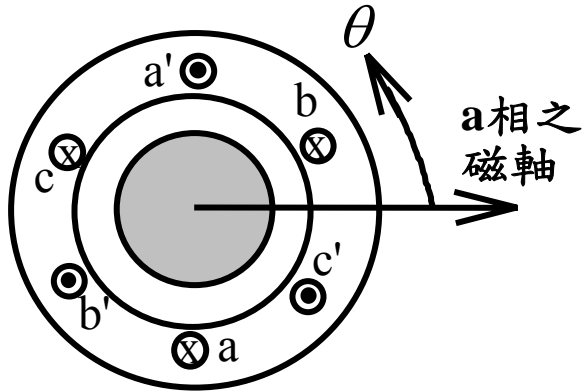
$$\frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t - \theta) + \frac{1}{2} N I_m \cos(\omega t + \theta) \stackrel{\Delta}{=} F_f + F_b$$

Forward

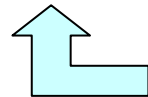
Backward

- 僅生脈動旋轉磁場，可分解成 Forward 及 Backward 旋轉磁場，如為單相馬達，轉子不能自行啟動，可運轉，但具近乎兩倍頻之脈動轉矩 (Pulsating torque)。

三相線圈(m=3)之旋轉磁場



$$\begin{aligned}
 F(\theta, t) &= N i_a \cos \theta + N i_b \cos(\theta - 120^\circ) + N i_c \cos(\theta + 120^\circ) \\
 &= N I_m \cos \omega t \cos \theta + N I_m \cos(\omega t - 120^\circ) \cos(\theta - 120^\circ) \\
 &\quad + N I_m \cos(\omega t + 120^\circ) \cos(\theta + 120^\circ) \\
 &= 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t) \\
 &\quad + 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t + 120^\circ) \\
 &\quad + 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t - 120^\circ) \\
 &= \frac{3}{2} N I_m \cos(\theta - \omega t)
 \end{aligned}$$



Only forward

- 合成抵消 Backward 旋轉磁場，僅生 Forward 旋轉磁場，轉子具啟動轉矩，運轉矩平順。
- 逆相序電流 → 產生逆向旋轉磁場。
- 諧波電流 → 諧波(Harmonic)旋轉磁場。

◎ 物理意義 (Physical Meaning):

三相電樞繞組所生之合成磁動勢為：

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} NI_m \cos(\theta - \omega t) \triangleq F_m \cos(\theta - \omega t)$$

(a) 於 $\omega t = 0$ 時，磁動勢於空間之分佈為：

$F(\theta, 0) = F_m \cos(\theta) \Rightarrow$ 可於 $\theta = 0$ 及 $\theta = \pi$ 處形成磁極。

(b) 於 $\omega t = \pi/2$ 時，磁動勢於空間之分佈為：

$F(\theta, \pi/2) = F_m \cos(\theta - \pi/2) \Rightarrow$ 可於 $\theta = \pi/2$

及 $\theta = 3\pi/2$ 處形成磁極，比(a)時之磁極座落轉了

$\theta = \omega_r t = \pi/2$ 此處 ω_r 轉子之轉速，磁極數設為兩極。

◎ $m=2$ (兩相): $P=2$ (兩極)

兩相對稱(Symmetrical)電樞繞組於空間互相差 90° 電氣角放置，通以互相差 90° 電氣角之兩相平衡(Balanced)電流，其所生之合成磁動勢F為：

$$F(\theta, t) = N_m i_m \cos \theta + N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ)$$

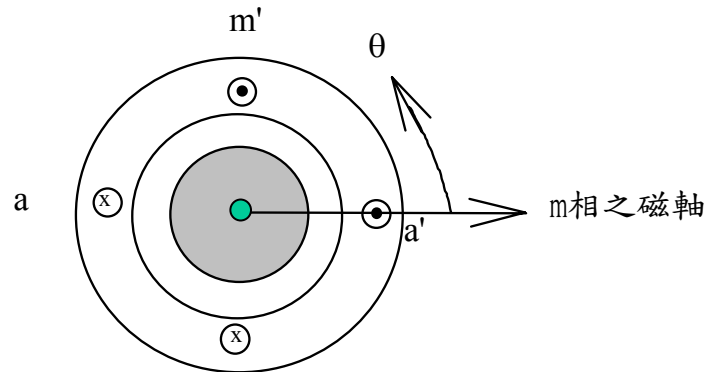
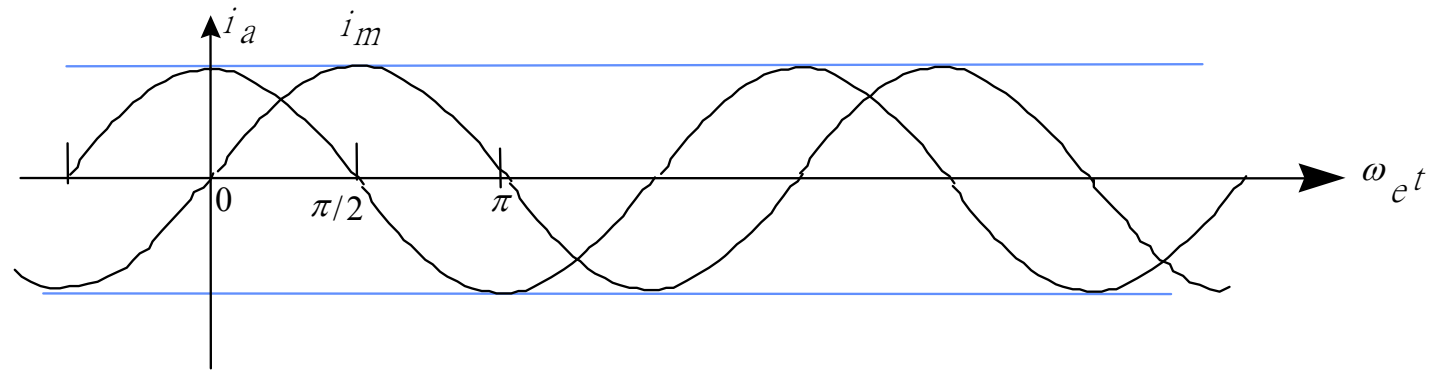
因兩相電流為平衡，即(令電角頻率 $\omega_e = \omega = 2\pi f$)：

$$i_m(t) = I_m \cos \omega t$$

$$i_a(t) = I_a \cos(\omega t + 90^\circ)$$

因此，如令 $N_a = N_m = N, I_a = I_m$

$$\begin{aligned}
F(\theta, t) &= N_m i_m \cos \theta + N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ) \\
&= N_m I_m \cos \omega t \cos \theta + N_m I_m \cos(\omega t + 90^\circ) \cos(\theta + 90^\circ) \\
&= 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t) \\
&\quad + 0.5 N I_m \cos(\theta - \omega t) + 0.5 N I_m \cos(\theta + \omega t + 180^\circ) \\
&= N I_m \cos(\theta - \omega t)
\end{aligned}$$



II. STRUCTURE AND GOVERNING EQUATIONS

■ Classification of BDCMs

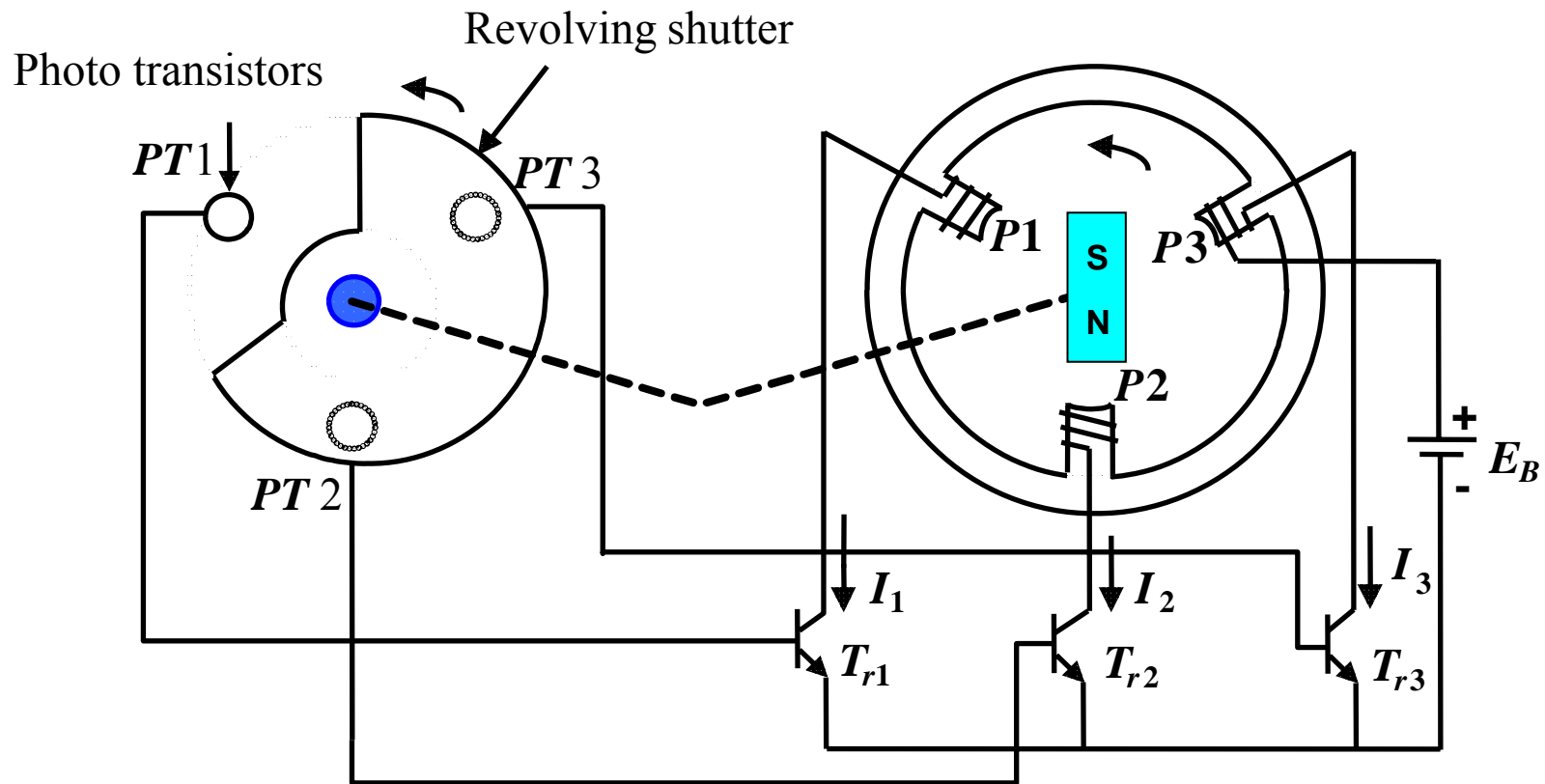
Speed servo drive: square-wave BDCM

- Using photo sensor

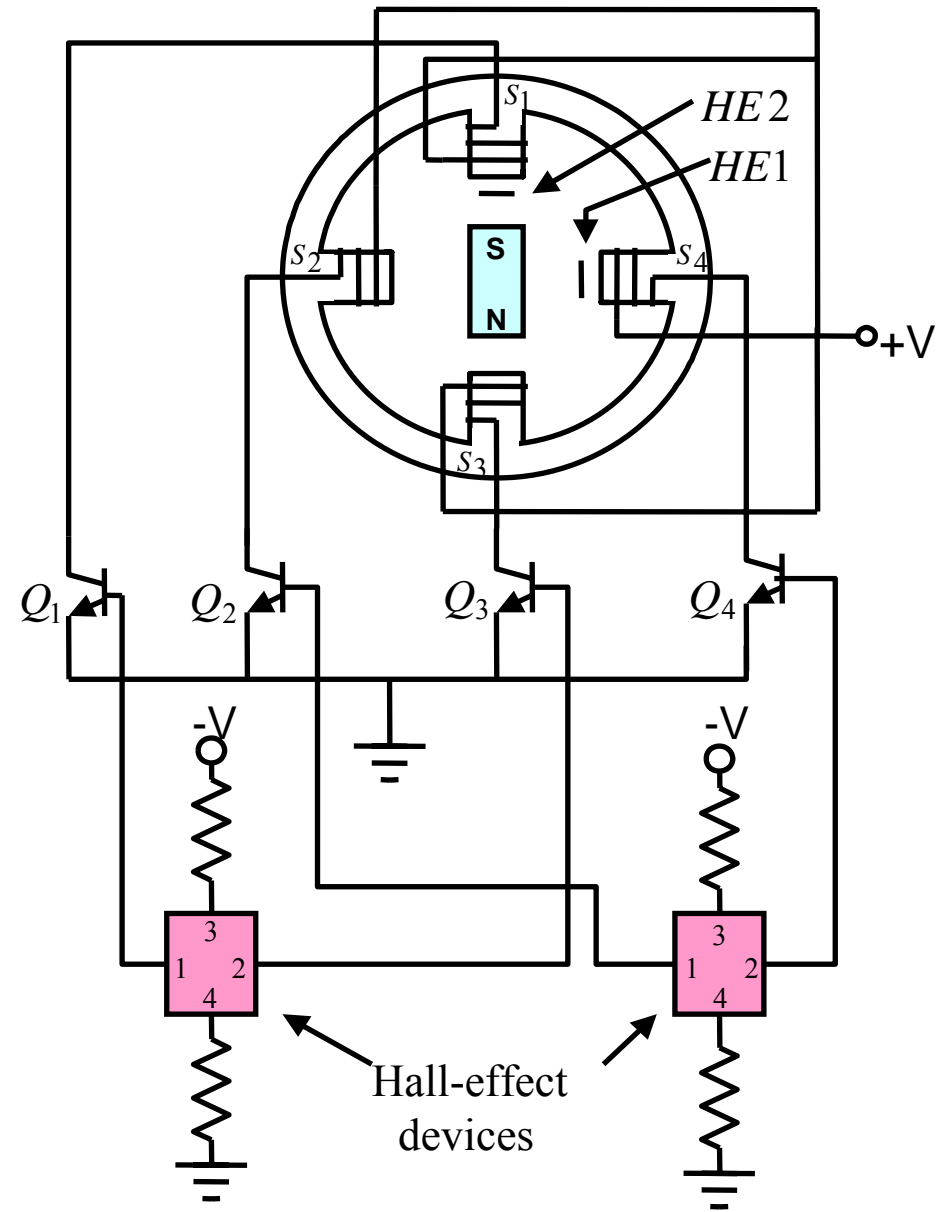
- Using Hall sensor

Position servo drive: sine-wave BDCM

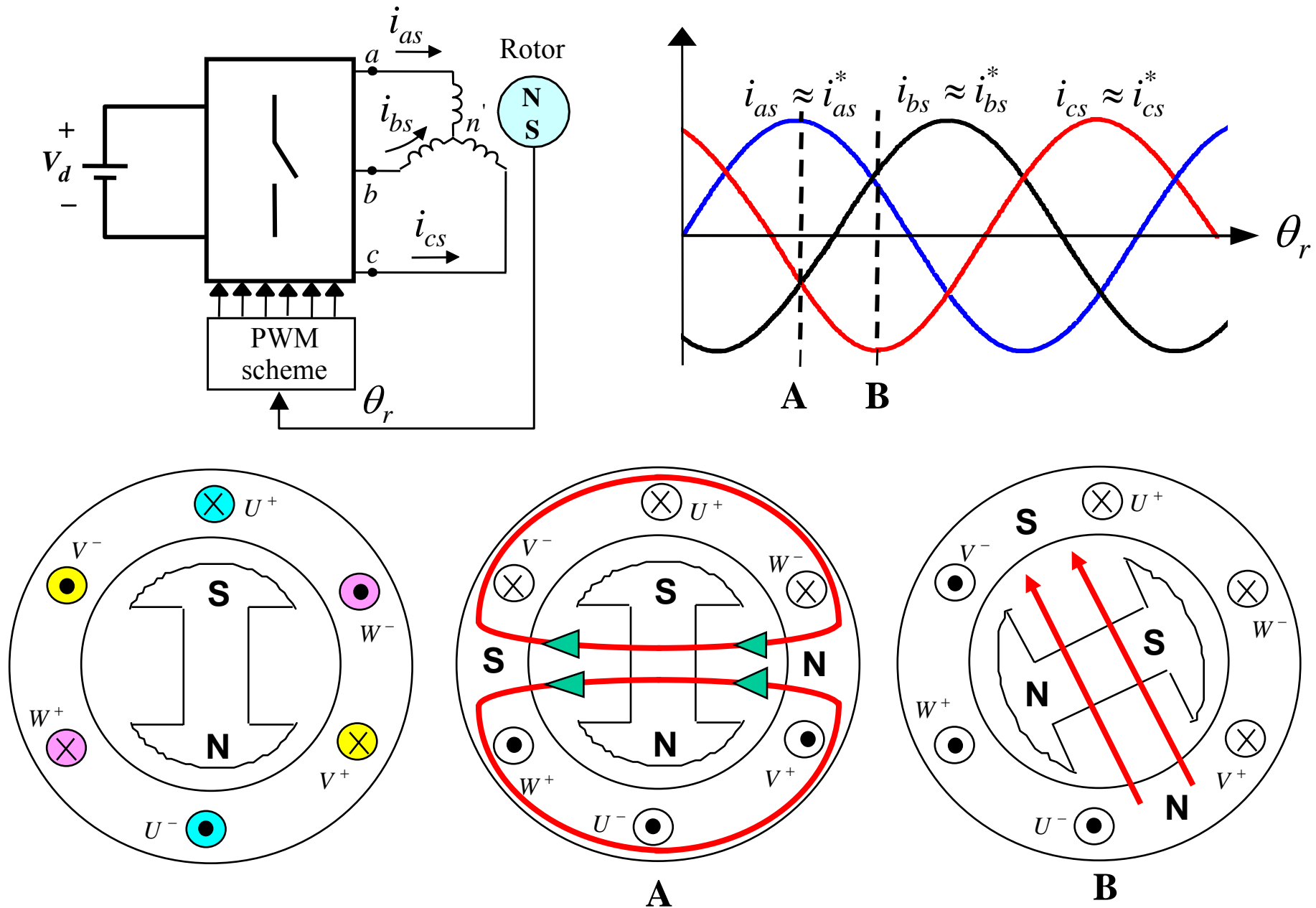
■ Square-wave BDCM: using photo sensor



■ **Square-wave
BDCM: using
Hall sensor**

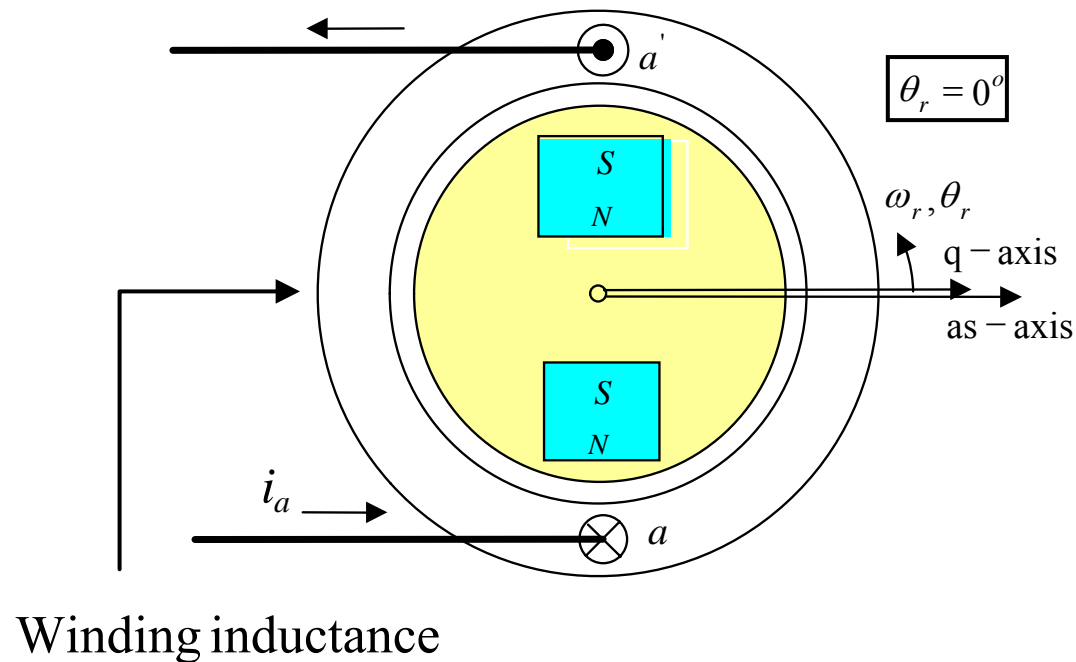


■ Operating principle of sine-wave BDCMs



◆ 磁凸極對線圈電感之影響：

由於IPM轉子具有永久磁石及凸極效應，且磁石之導磁係數遠小於鐵心之導磁係數 ($\mu_m < \mu_c$)，亦即 $R_m > R_c$ ，使得IPM之 q 軸電感不等於 d 軸電感 ($L_q > L_d$)。電樞電感值為轉子位置 (θ_r) 之非線性函數，且此電感值亦與激磁頻率和激磁電流之準位有相當之關聯。線圈電感與轉子位置之關係：



⊗ The developed torque

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m^r I_{as} \cos \beta - (L_d - L_q) I_{as}^2 \sin \beta \cos \beta]$$
$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m^r I_{as} \cos \beta + \frac{L_q - L_d}{2} I_{as}^2 \sin 2\beta]$$

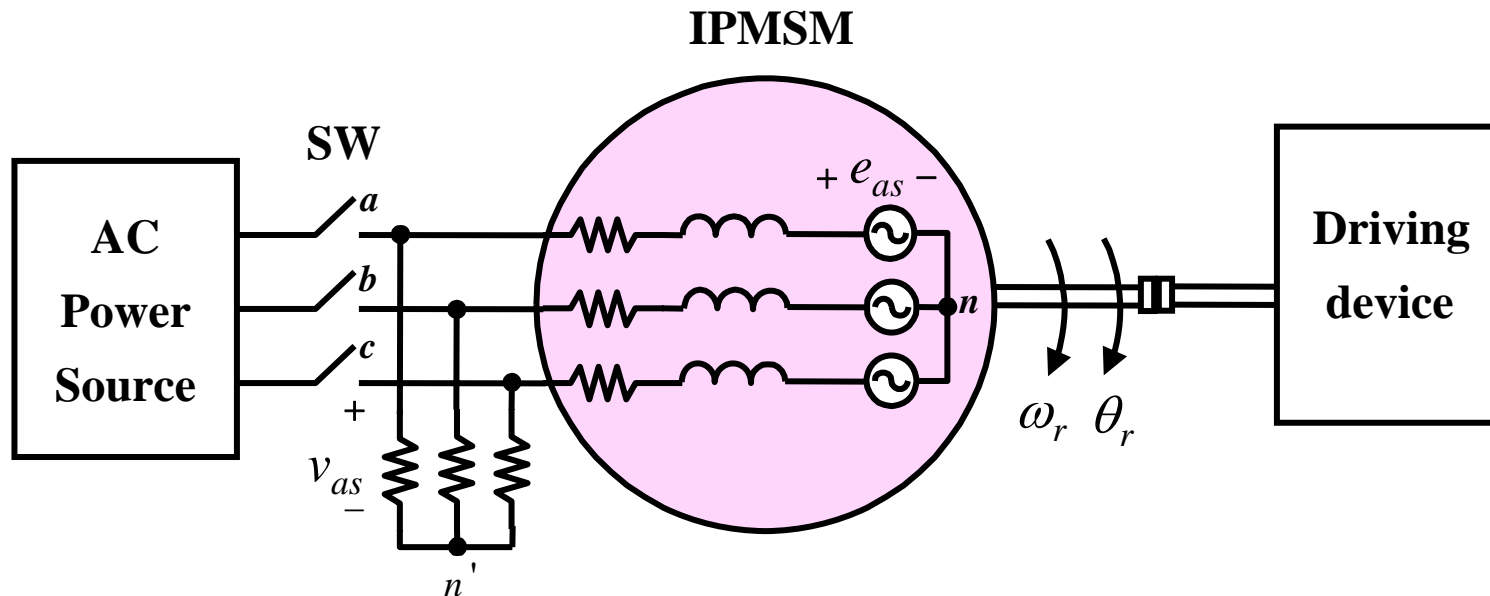
Electromagnetic
torque

Reluctance
torque

- For an IPMSM, its developed torque consists of both electromagnetic torque and reluctance torque due to $L_d \neq L_q$

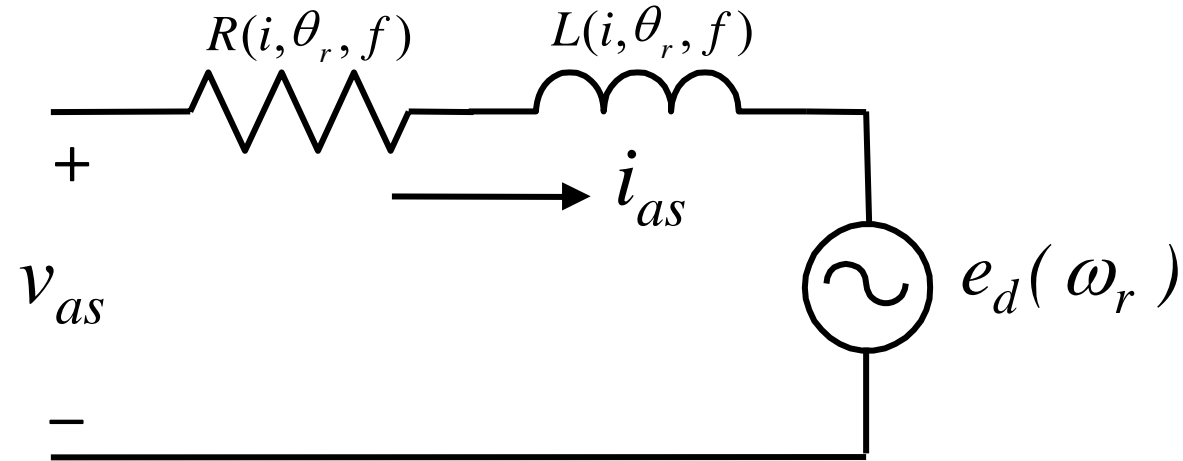
III. ESTIMATION OF EQUIVALENT CIRCUIT PARAMETERS

- Experimental mechanism for making parameter estimation



- Rotor is locked at a particular position and the winding is excited with a variable-frequency and variable-current AC source.
- The voltage, current and power are recorded.

■ Per-phase equivalent circuit model



⊗ **Back EMF constant estimation:**

$$e_d = k_t \omega_r$$

⊗ **Flux linkage amplitude estimation:**

$$\lambda'_m$$

⊗ Winding inductances

$$L_{asas} = L_{ls} + L_A + L_B \cos 2\theta_r$$

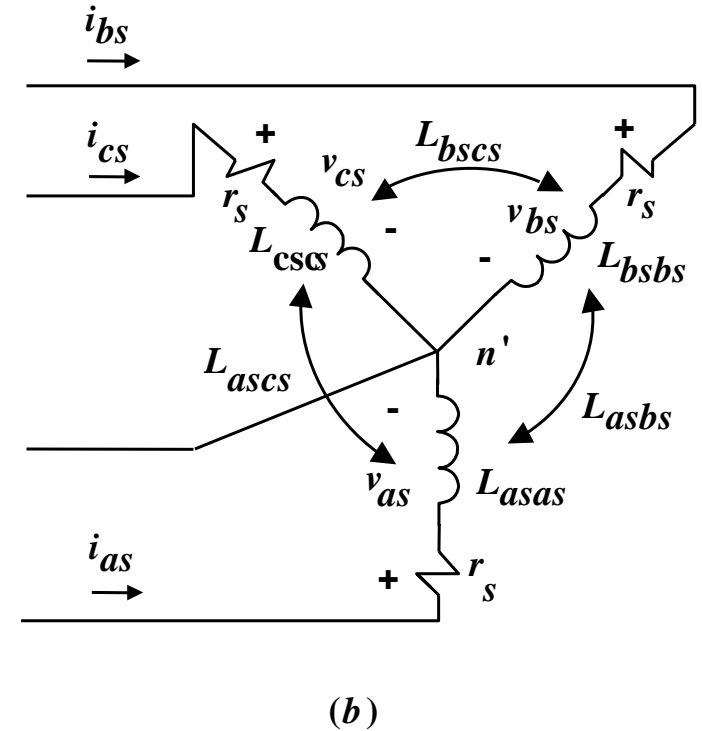
$$L_{bsbs} = L_{ls} + L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{csbs} = L_{ls} + L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right)$$

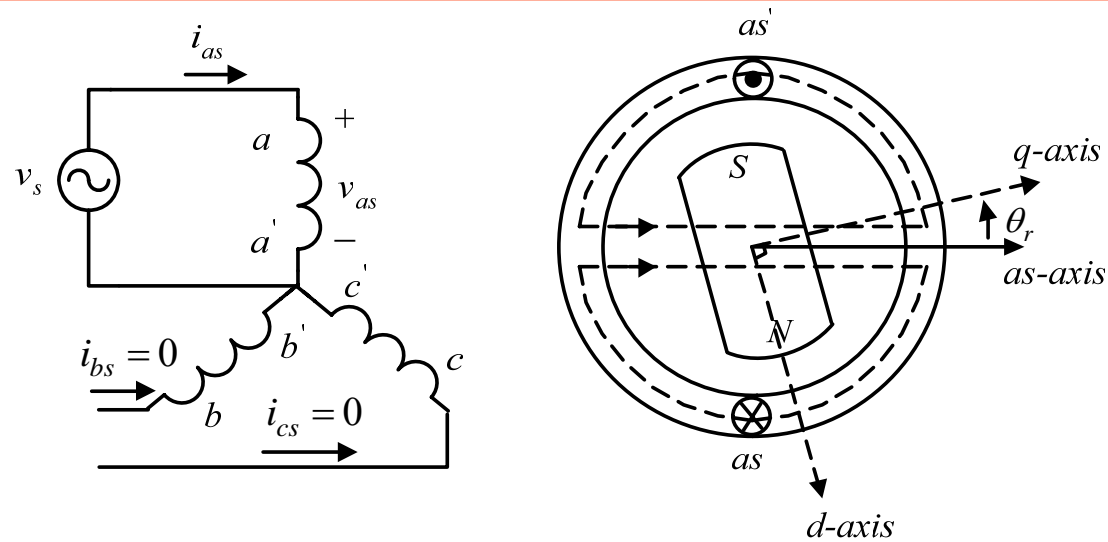
$$L_{asbs} = L_{bsas} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{ascs} = L_{csas} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{bscs} = L_{csbs} = -\frac{1}{2}L_A + L_B \cos 2(\theta_r + \pi)$$



■ Y-connected with non-isolated neutral



$$\boxed{\otimes} \quad v_s = v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} \left[(L_{ls} + L_A + L_B \cos 2\theta_r) i_{as} \right] = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} \left[L_{asas}(\theta_r) i_{as} \right]$$

$$L_{asas, \max} = L_{asas}(\theta_r = 0) = L_{ls} + L_A + L_B$$

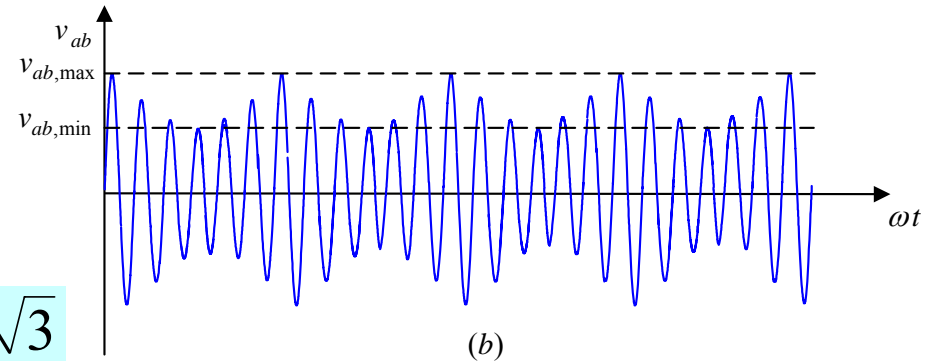
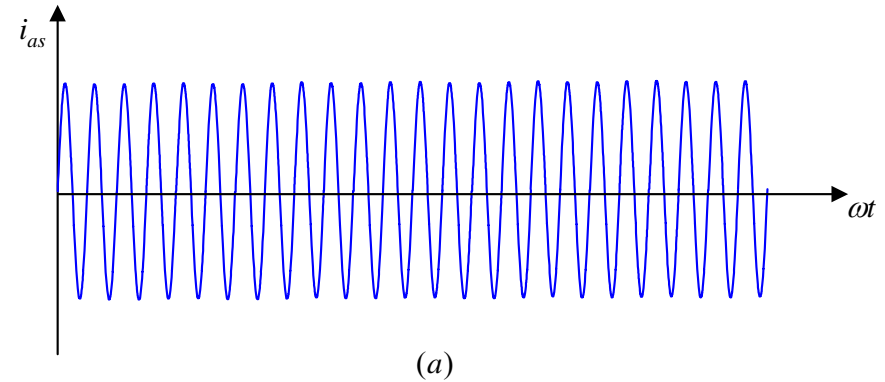
$$L_{asas, \min} = L_{asas}(\theta_r = 0.5\pi) = L_{ls} + L_A - L_B$$

$$L_q \approx \frac{3}{2} L_{asas, \max}, \quad L_d \approx \frac{3}{2} L_{asas, \min}$$

$$L_q^{\Delta} = L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A + L_B), \quad L_d^{\Delta} = L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A - L_B)$$

Parameter estimation via slip test

- ⊗ Stator is excited by a three-phase current source, and rotor is driven at a speed slightly different from the synchronous speed.
- ⊗ Synchronous rotating flux encounters different reluctance paths.



$$Z_d = \frac{v_{ab,min} / \sqrt{3}}{\sqrt{2}I_L}, \quad Z_q = \frac{v_{ab,max} / \sqrt{3}}{\sqrt{2}I_L}$$

$$L_d = \frac{\sqrt{Z_d^2 - r_s^2}}{\omega}, \quad L_q = \frac{\sqrt{Z_q^2 - r_s^2}}{\omega}$$

滑差測試

- 滑差測試所量得之線電壓波形

