

## 电机等效电路参数的转换

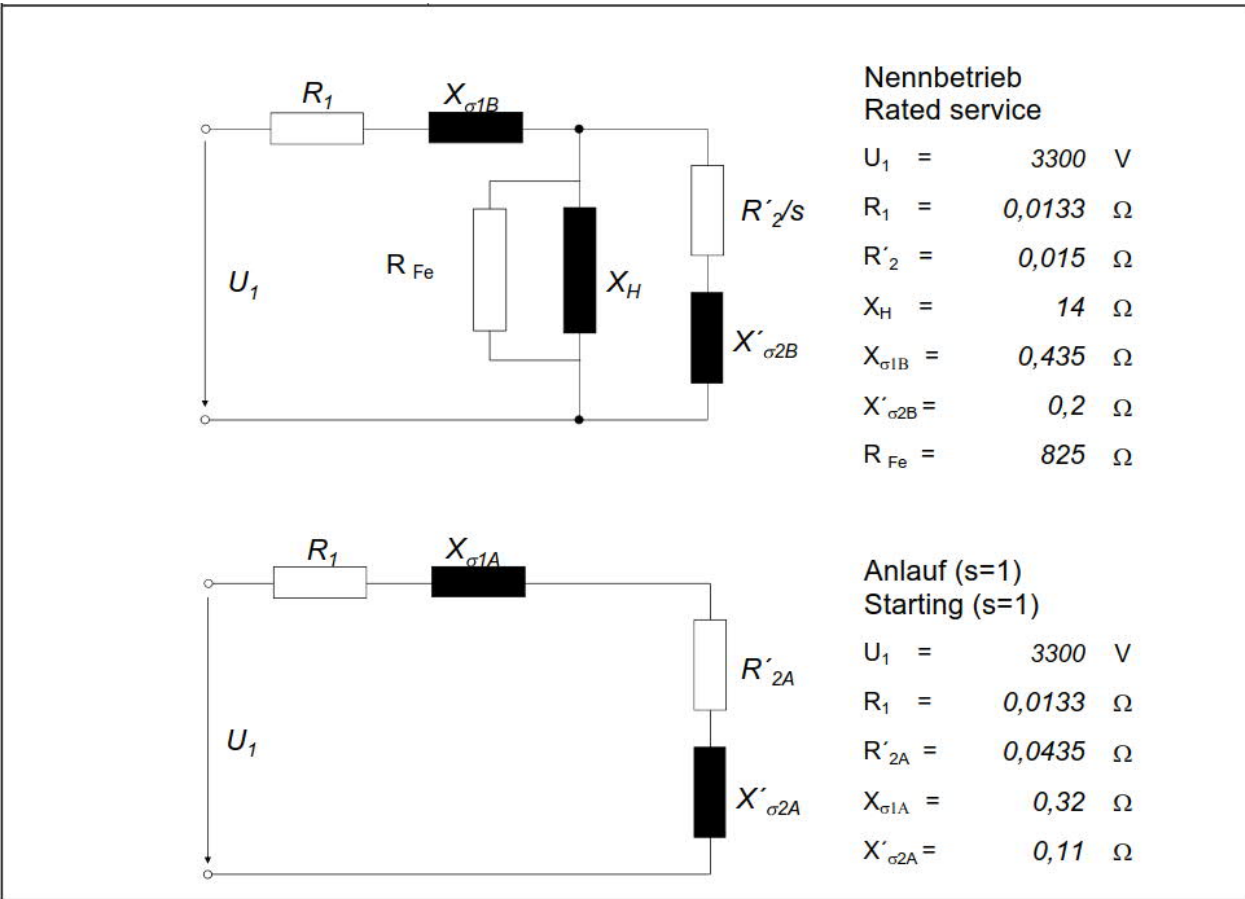
高性能的中压驱动一般不对电机进行自动辨识和自动优化，因此驱动特性的好坏也依赖于电机厂家提供的数据。一般的，电机厂家都会提供电机的等效电路图及参数给最终用户。但是由于数值单位的不同，造成了其所给的大多数数值并不能够直接输入到 **Starter** 中直接使用。

当然，如果电机厂家给的参数是标么值的，无论电机的接法，均可以直接输入到 **Starter** 中使用。

以下示例描述电机厂家给出的等效电路参数全为欧姆时的参数转换方法。

以西门子的某型电机为例，其提供的 **Date Sheet** 如下：

Bemerkung Remark				
Motor Typ Motor type	MHXA-800MA-04		Bemessungsleistung Rated output	10000 kW
Bemessungsspannung Rated voltage	3300 V $\Delta$	Bemessungsstrom Rated Current ( $C_R$ )	1975 A	MLFB
Drehzahl Speed	1200 1/min rpm	Leistungsfaktor Power factor	0,91	
Frequenz Frequency	40,2 Hz c/s	Polzahl Number of poles	4	Bemessungsmoment Rated Torque ( $T_R$ ) 79583 Nm
Tag : Date Name : Name				Nr. No.
Bearbeitet : Designed	29.11.17	Stark	13654	
Geprüft : Checked				



可以发现，电机厂家给出的电路等效图的参数全部为欧姆单位，这与 **Starter** 中的所需要的参数的单位设置并不匹配。如下所示，无论 p349 的设置为 1 和 2 均无法匹配，即电机参数无法直接输入使用，需要单位换算。

- 当 p349 = 1 时，ECD 参数单位为物理单位，如下：

p349		System of units motor equivalent circuit diagram data	[1] System of units, physical	
p350[0]	M	Motor stator resistance cold	0.00444	ohm
p352[0]	M	Cable resistance	0.00000	ohm
p353[0]	M	Cable inductance	0.000	mH
p354[0]	M	Motor rotor resistance cold / damping resistance d axis	0.00502	ohm
p356[0]	M	Motor stator leakage inductance	0.57289	mH
p358[0]	M	Motor rotor leakage inductance / damping inductance d axis	0.26429	mH
p360[0]	M	Motor magnetizing inductance/magn. inductance d axis saturated	18.47381	mH

- 当 p349 = 2 时，ECD 参数单位为百分比，如下：

p349		System of units motor equivalent circuit diagram data	[2] System of units referred	
p350[0]	M	Motor stator resistance cold	0.46025	%
p352[0]	M	Cable resistance	0.00000	%
p353[0]	M	Cable inductance	0.000	%
p354[0]	M	Motor rotor resistance cold / damping resistance d axis	0.52038	%
p356[0]	M	Motor stator leakage inductance	14.99999	%
p358[0]	M	Motor rotor leakage inductance / damping inductance d axis	6.91991	%
p360[0]	M	Motor magnetizing inductance/magn. inductance d axis saturated	483.70010	%

## 标准等效电路图与电机厂家给出的等效电路图对比

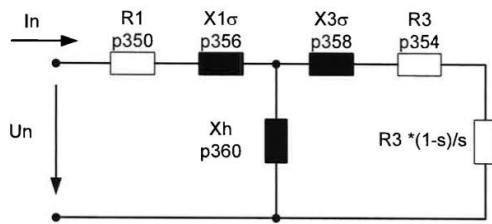
为了确定厂家给出的等效电路图中的参数与 **Starter** 中的参数的一一对应关系，应先进行图形的比对。电机厂家提供等效电路图的参数符号、描述、电路不尽相同，也是需要对比的一个重要因素。

比对时，应忽略  $R_{Fe}$  参数，并选取电机转差率  $s=0$  时的参数，如  $R'_2/s$  只用取  $R'_2$  的值即可。

**Starter** 中参数对应的标准等效电路图如下：

SIEMENS AG

Induction Motor  
Equivalent circuit diagram



Site Name:	_____	Application:	_____
Date:	_____		

		Rated conditions	Peak load rated speed	Peak Load max speed
Voltage	V			
Power	kW			
Current	A			
cos f				
Speed	1/min			
Frequency	Hz			
Torque	kNm			
Efficiency	%			

Resistances			Main Reactances saturated			Leakage Reactances		
	pu	Ohm		pu	Ohm		pu	Ohm
R1 / p350			Xh / p360			X1s / p356		
R3 / p354						X3s / p358		

针对上述的例子，比对初步结果如下：

$$p350 = 0.0133\Omega$$

$$p354 = 0.015\Omega$$

$$p356 = 0.435\Omega$$

$$p358 = 0.2\Omega$$

$$p360 = 14\Omega$$

显然，由于上述参数的单位与 **Starter** 的要求不同，无法直接使用。

## 单位换算 (p349 = 1)

应该明确, **Starter** 内部的电机等效电路参数是以星形接法 (Y 型接法) 为基础的。如果为电机为三角形接法, 应先将电机厂家所给的所有等效电路参数除以 3。

此例中, 由于电机接法为三角形接法, 应先将上述比对后的结果都除以 3, 计算后得到以下的数值:

$$p350 = 0.0133\Omega / 3 = 0.0044333333333333\Omega$$

$$p354 = 0.015\Omega / 3 = 0.005\Omega$$

$$p356 = 0.435\Omega / 3 = 0.145\Omega$$

$$p358 = 0.2\Omega / 3 = 0.0666666666666667\Omega$$

$$p360 = 14\Omega / 3 = 4.666666666666667\Omega$$

由于 p356、p358、p360 的物理单位为 mH, 因此需要再继续将欧姆换算成 mH。换算公式为:  $X_L = 2 \pi f L$ , 其中,  $X_L$  单位为  $\Omega$ ,  $f$  单位为 Hz,  $L$  单位为 H。此处注意单位要换成 mH, 须乘以 1000), 频率  $f$  是电机额定频率, 计算得到如下数值:

$$\begin{aligned} p356 &= 0.435\Omega / 3 = 0.145\Omega \\ &= 1000 \times \left[ 0.145\Omega / (2 \times 3.14 \times 40.2\text{Hz}) \right] = 0.5740663468155217\text{mH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p358 &= 0.2\Omega / 3 = 0.0666666666666667\Omega \\ &= 1000 \times \left[ 0.0666666666666667\Omega / (2 \times 3.14 \times 40.2\text{Hz}) \right] = 0.2639385502600101\text{mH} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p360 &= 14\Omega / 3 = 4.666666666666667\Omega \\ &= 1000 \times \left[ 4.666666666666667\Omega / (2 \times 3.14 \times 40.2\text{Hz}) \right] = 18.4756985182007\text{mH} \end{aligned}$$

综上, 得到如下的 **Starter** 可以使用的 ECD 数据 (p349 = 1), 如下:

$$p350 = 0.0044333333333333\Omega$$

$$p354 = 0.005\Omega$$

$$p356 = 0.5740663468155217\text{mH}$$

$$p358 = 0.2639385502600101\text{mH}$$

$$p360 = 18.4756985182007\text{mH}$$

## 单位换算（p349 = 2）

标么值的计算需要一个参考值，参考值称为参考阻抗（Ref. Impedance），这个值也与电机的连接方式有关。

当电机为星形（Y）连接时，相电压等于线电压/ $\sqrt{3}$ ，相电流等于线电流：

$$Z_n = \frac{U/\sqrt{3}}{I}$$

当电机为角形（Δ）连接时，相电压等于线电压，相电流等于线电流/ $\sqrt{3}$ ：

$$Z_n = \frac{U}{I/\sqrt{3}}$$

上述 2 个公式中，U 为电机额定电压（线电压），I 为额定电流（线电流）。等效电路是按照 per phase 来计算电压和电流的。

此例中，电机连接方式为角形（Δ）连接，因此其参考阻抗为：

$$Z_n = \frac{\sqrt{3} U}{I} = \frac{\sqrt{3} \times 3300}{1975} = 2.894059577203694\Omega$$

基于此参考阻抗值（欧姆），采用电机厂家给出的原等效电路参数值（欧姆，此处不用考虑电机连接方式），就可以算出其标么值，最后再换算成百分比，如下。因此，当 p349 = 2 时，以下的值也是可以直接输入 Starter 的：

$$p350 = 0.0133\Omega / Z_n = 0.0045956206654359 = 0.45956206654359\%$$

$$p354 = 0.015\Omega / Z_n = 0.0051830308256796 = 0.51830308256796\%$$

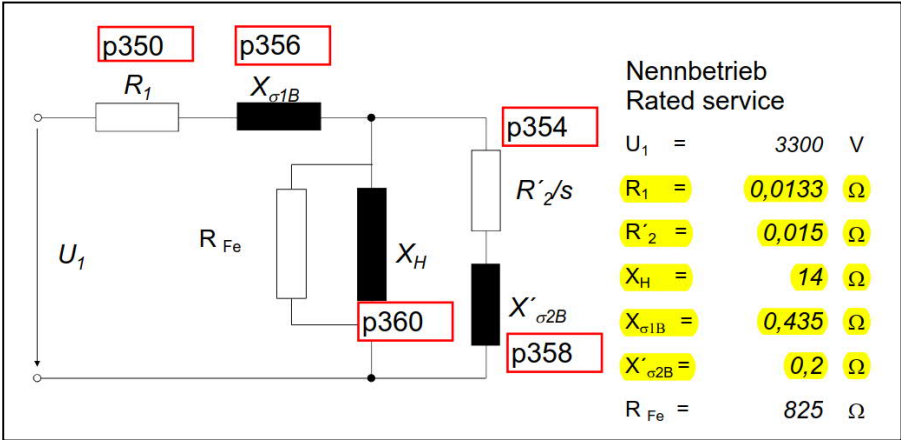
$$p356 = 0.435\Omega / Z_n = 0.1503078939447082 = 15.03078939447082\%$$

$$p358 = 0.2\Omega / Z_n = 0.0691070776757279 = 6.91070776757279\%$$

$$p360 = 14\Omega / Z_n = 4.837495437300955 = 483.7495437300955\%$$

注意，在驱动调试初期就应该确认 p349 的取值，因为在切换时存在小数位截取、取整、四舍五入的过程而导致数值不准确。在 Starter 离线时，就可以切换 p349 参数，可以看到这些 ECD 参数会自动计算的结果。不要来回多次切换，这样会导致数值越来越不准确。可以看到，本示例的 Starter 的 2 个图片中的参数与我们手动计算的值是相差不大的。

p304	Rated motor voltage	3300	Vrms
p305	Rated motor current (n * In, as one winding)	1975	Arms
P307	Rated power	10000	kW
p308	Rated power factor	0.91	
p310	Rated motor frequency	40.2	Hz
	Motor Connection Type	Delta	D
p311	Rated motor speed	1200	rpm
p312	Rated motor torque	98473	Nm
p314	Motor pole pair number	3	
p322	Maximum motor speed(Mech.)	1200	rpm
p323	Maximum motor current	1095	Arms
p341	Motor moment of inertia	274.6	kg.m2
p344	Motor weight (for the thermal motor model)	16400	kg
ZB	Ref. Impedance (for per unit)	2.894059577	ohm
wn	wn=2*pi*f	252.5840493	rad/s



U1 / V	3300	@ s=0		p349=1		p349=2			
p350	Motor stator resistance cold / R1	0.0133	ohm	0.004433333	ohm	0.459562067	%	0.004595621	p.u.
p352	Cable resistance	0	ohm		ohm		%	0	p.u.
p353	Cable inductance	0	ohm		mH		%	0	p.u.
p354	Motor rotor resistance cold / damping resistance d axis / R'2	0.015	ohm	0.005	ohm	0.518303083	%	0.005183031	p.u.
p356	Motor stator leakage inductance / X1σ	0.435	ohm	0.574066337	mH	15.03078939	%	0.150307894	p.u.
p358	Motor rotor leakage inductance / damping inductance d axis / X2'σ	0.2	ohm	0.263938546	mH	6.910707768	%	0.069107078	p.u.
p360	Motor magnetizing inductance/magn. inductance d axis saturated / Xm	14	ohm	18.4756982	mH	483.7495437	%	4.837495437	p.u.

上表为采用 EXCEL 工具计算的结果。在 Starter 中可以采用切换 p349 的方式来验证这个方法和结果。



## 采用 EXCEL 工具验证的实例

以下电机为双绕组电机，且电机厂家已经给出了 2 种换算过的等效电路参数，因此可以用来验证 EXCEL 工具的正确性。

计算参考阻抗（基本阻抗或者额定阻抗）时，多个绕组应等同于一个绕组，各绕组电流应计入总电流。此例电机的额定电流按  $2 \times 1574\text{A} = 3148\text{A}$  计算，工具有说明。

Three-Phase Induction Motor with Laminated Squirrel Cage Rotor				Order No.	
				Order date	
				Manuf. No.	
				24.08.17	
				D175019162010001	
Type	1TZ7171-1QP00-4DB1	Cooling System	IC86W	Mounting	IM1002
Unit	1	Cooling Circuit	sec. prim.	Enclosure	IP55
Drive for	Other Drives	Cooling Medium	water air	Ex-Prot.	--
Type Dr.Mach.		Coolant Flow	m³/h 11.1 m³/s	Ex-Standard	--
Required power	16000 kW	Inlet Temp.	40 °C 50 °C	Insul. System	Micalastic
Standard	IEC 60034	Ventilation System	bilat.	Thermal Class	F
Rotation	cw	Type of Fan	separate	Service Altitude	≤ 1000 m
				Over-Speed	2650 min <sup>-1</sup>
				Inertia Motor/Load	1.139 / tm <sup>2</sup>
Converter Sinamics SM150 (IGCT) 2 - 6-pulse				Load Curve	
2 Systems, not electr. displaced				Part 1: 0.42 - 1.00 · NN : m = const	
Over-Speed, Skip-Band-Width and Technical Endurance acc. to Mechanical Design Office				Part 2: 1.00 - 1.84 · NN : m = 1/n	
Operating Data		Rated Point		Max. speed	
Min. speed					
Output	kW	16000		16000	
Voltage	V	2 · 3300	D	2 · 3300	D
Frequency	Hz	40		73.33	
Current	A	2 · 1574		2 · 1697	
Speed	min <sup>-1</sup>	1195		2190	
Power Factor		0.90		0.85	
Cooling Temperature sec./prim.	°C	40 / 50		40 / 50	
Stator Winding Temperature	°C	≤ 125	(ETD)	≤ 125	(ETD)
Duty Type		S1		S1	
Remarks					
Efficiency			Losses at Rated Load		
Load	Speed	Voltage	P.F.	Efficiency	
1.00	1.00	1.00	0.90	98.0 % +	x Bearing Friction kW
0.75	0.75	0.75	0.90	97.8 % +	x Windage kW
0.50	0.50	0.50	0.90	97.2 % +	x Core kW
					x I <sup>2</sup> R <sub>DC</sub> Stator 95 °C kW
					x I <sup>2</sup> R <sub>DC</sub> Rotor 95 °C kW
					x Additional acc. to IEC 60034 kW
					x Converter Supply kW
					Separated Fan Power kW
x Marked Losses are included in the Efficiency					
Resistances, Reactances				Time Constants	
Ref. Impedance ZN = 1.816 Ω				Ref. Temperature 95 °C	
F=0 F=FN				Ref. Temperature 95 °C	
R2' s=0 s=1				T0 6.703 s TG 0.149 s	
X1S 3.80 ‰ 18.40 ‰				T(3K) 0.035 s	
X2S' 0.123 p.u. 0.127 p.u.					
XM 0.1180 p.u. 0.072 p.u.					
XK 4.654 p.u. 6.369 p.u.					
Comm.React./Ind./System (F=Hz)					
Magnetic Forces		Short Circuit		Magnetic Current at SN	
Excentric	CM(N=0) 20.59 kN/mm	Sudden sc torque3-ph(R.fld.) 6.23 p.u.		U/UN	
	CM(N=NN)	2-ph 7.12 p.u.		0.80 1.00 1.10	
Axial	FML1 2.32 kN	Ref. Values		IMUE [A]	
	FMLmax 6.52 kN	Rated current 2 · 1574 A		2 · 212 2 · 330 2 · 425	
	FM_AX kN	Rated torque 127.81 kNm		Starting and Break Down Torque at UN	
				MA/MN 0.652 p.u.	
				IA/IN 5.698 p.u.	
				SK 1.57 %	
				MK/MN 2.207 p.u.	
				COSφK 0.034	

Three-Phase Induction Motor with Laminated Squirrel Cage Rotor

Order No.  
Order date  
Manuf. No.

24.08.17  
D175019162010001

Equivalent circuit diagram

$P_N$   
 $U_{N1}$   
 $I_{N1}$

16000 kW  
3300 V  
A

$F_N$   
 $N_N$

40 Hz  
1195 min<sup>-1</sup>

The diagram illustrates the equivalent circuit of a three-phase induction motor. It features a series path starting with the stator resistance  $R_1$  (labeled p350), followed by the stator leakage reactance  $X_{1\sigma}$  (labeled p356). This is followed by a node that branches into a shunt path containing the magnetizing reactance  $X_M$  (labeled p360) and a series path containing the rotor leakage reactance  $X_{2\sigma}'$  (labeled p358) and the rotor resistance  $R_2'/s$  (labeled p354). The input voltage  $U_{1\text{ phase}}$  is applied across the entire series combination.

Rated impedance  
Resistance values at

1.816 Ω per phase  
95 °C

Stator resistance at $F=F_N$	$R_1$	0.0047 p.u.	0.009 Ω per phase
Stator resistance at $F=0$	$R_1$	0.0044 p.u.	0.008 Ω per phase
Rotor resistance at $s=1$	$R_2'$	0.0184 p.u.	0.033 Ω per phase
Rotor resistance at $s=0$	$R_2'$	0.0038 p.u.	0.007 Ω per phase
Stator reactance at $s=1$	$X_{1\sigma}$	0.1270 p.u.	0.231 Ω per phase
Stator reactance at $s=0$	$X_{1\sigma}$	0.1230 p.u.	0.223 Ω per phase
Rotor reactance at $s=1$	$X_{2\sigma}'$	0.0720 p.u.	0.131 Ω per phase
Rotor reactance at $s=0$	$X_{2\sigma}'$	0.1180 p.u.	0.214 Ω per phase
Magnetizing reactance at $s=1$	$X_M$	6.3690 p.u.	11.566 Ω per phase
Magnetizing reactance at $s=0$	$X_M$	4.6540 p.u.	8.452 Ω per phase

Rotor values referred to stator



p304	Rated motor voltage	3300	Vrms
p305	Rated motor current (n * In, as one winding)	3148	Arms
P307	Rated power	16000	kW
p308	Rated power factor	0.9	
p310	Rated motor frequency	40	Hz
	Motor Connection Type	Delta	D
p311	Rated motor speed	1195	rpm
p312	Rated motor torque	127810	Nm
p314	Motor pole pair number	3	
p322	Maximum motor speed(Mech.)	1200	rpm
p323	Maximum motor current	1095	Arms
p341	Motor moment of inertia	274.6	kg.m2
p344	Motor weight (for the thermal motor model)	16400	kg
ZB	Ref. Impedance (for per unit)	1.815682232	ohm
wn	wn=2*pi*f	251.3274123	rad/s

U1 / V	3300	@ s=0		p349=1		p349=2			
p350	Motor stator resistance cold / R1	0.009	ohm	0.003	ohm	0.495681449	%	0.004956814	p.u.
p352	Cable resistance	0	ohm		ohm		%	0	p.u.
p353	Cable inductance	0	ohm		mH		%	0	p.u.
p354	Motor rotor resistance cold / damping resistance d axis / R'2	0.007	ohm	0.002333333	ohm	0.385530016	%	0.0038553	p.u.
p356	Motor stator leakage inductance / X1σ	0.223	ohm	0.295762936	mH	12.2818848	%	0.122818848	p.u.
p358	Motor rotor leakage inductance / damping inductance d axis / X2'σ	0.214	ohm	0.283826315	mH	11.78620335	%	0.117862033	p.u.
p360	Motor magnetizing inductance/magn. inductance d axis saturated / Xm	8.452	ohm	11.20981316	mH	465.4999566	%	4.654999566	p.u.

上表为采用 EXCEL 工具计算的结果。可以直接对比厂家提供的参数，也可在 Starter 中可以采用切换 p349 的方式来验证这个方法和结果。

若采用 **Starter** 的静态识别功能（**p1900 =2**），也可以粗略测出来这些参数，相差不是很大。中压电机识别出来的结果，只能说可以用，但并不推荐。

在本示例中，这台双绕组电机直接给出了标么值，而且是一个三角形连接，但是其参数可以直接被使用，而无需换算。