

# 大中功率节能调速传动的合理电压等级

马小亮

(天津电气传动设计研究所, 天津 300180; 天津大学电气自动化学院, 天津 300072)

**[摘要]** 大中功率风机和泵采用变频调速可节约大量电能, 大部分功率在 0.2~2 MW 范围中。我国现在 200 kW 以上的电机多是中压, 现行中压电网多为 10 kV, 选用 10 kV 直接变频从技术和经济角度看都不太合理。由于变频器输入侧都有变压器, 因此电机和变频器没有必要和电网一致。文章讨论不同功率段的合理电压等级以及在电机电压和电网电压不同情况下当变频器出现故障时如何实现旁路工作。

**[关键词]** 大中功率; 节能调速; 合理电压等级; 低压变频; 中压变频; 旁路

## 1 问题的提出

我国发电总量 60% 以上是通过电动机消耗的, 其中一半以上用于各种风机和泵。以调速传动代替原有的不调速传动, 通过改变转速来调节流量和压力, 取代传统的用风挡和阀门调节的方法, 平均可节电 30% 左右, 估计全年可节电数百亿千瓦时。此外调速传动还可改善锅炉燃烧, 节约大量燃料。

现在许多中小功率 (<200 kW) 的风机和泵采用低压 IGBT 变频调速传动, 取得很好效果, 正大量推广。200 kW 以上的大中功率风机和泵传动量很大, 用电量占整个风机和泵用电量的大部分, 节电潜力巨大, 但由于变频器价高, 采用调速传动的很少, 只有少量试点。

200 kW 以上大中功率传动中各功率段占的市场比例示于图 1。0.2~2 MW 占 55%, 2~5 MW 占 22%。文本着眼于这两个功率段、特别是 0.2~2 MW 功率段的变频问题。

我国现有的交流电动机, 200 kW 是个界线, 200 kW 以下是低压 380 V, 200 kW 以上是中压 3 kV、6 kV 和 10 kV。电力部门从减小线损角度出发, 希望提高供电电压, 3 kV 级已取消, 6 kV 正在淘汰中, 大力推行 10 kV 供电, 将来有可能提

高至 20 kV。用户从简化配置出发, 很自然地希望 200 kW 以上的电机和变频器也都是 10 kV 的。不幸这合乎情理的要求技术上难以实现, 经济上价高, 特别是在 0.2~2 MW 功率范围内。原因是:

1) 10 kV 电机从电机制造角度来看并不困难, 但随电压升高, 绝缘等级提高, 电机质量加大、价格上升。以 YJS 系列、四极 560 kW 电机为例, 380 V 的净重 3 650 kg, 价格 11 万元; 6 kV 的 3 900 kg, 15 万元; 10 kV 的 4 360 kg, 20 万元。

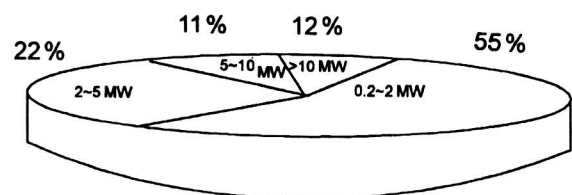


图 1 200 kW 以上传动的市场分布

Fig.1 Market of drives (>200 kW)

2) 受电力电子器件电压<sup>[1]</sup>及电机允许的  $dv/dt$  限制, 10 kV 变频器必须多电平、多器件串联, 造成线路复杂, 价格昂贵, 可靠性差。若使用 1 700 V IGBT 器件, 需 10 串、三相共 120 个器件。若使用 3 300 V IGBT 器件, 需 5 串、60 个器

件，数量巨大。另外，电机额定电流小，器件的电流能力得不到充分利用。仍以 560 kW 为例，电机额定电流仅 40 A 左右，现 1 700 V IGBT 电流已可达 2 400 A，3 300 V IGBT 电流可达 1 600 A，有大器件不能用，偏要用大量小器件串联，极不合理。即使电机功率达 2 MW，额定电流也只有 140 A 左右，仍很小。

为了电平隔离及改善输入电流波形，减少谐波，现有的中压变频器（1~10 kV）都在输入侧装有输入变压器，这种安排短时内不会改变。既然输入侧有变压器，变频器和电机的电压就没有必要和电网一样，非用 10 kV 不行。因此就出现变频器和电机的合理电压等级问题。这就是本文讨论的内容。主要涉及三个问题：一是中压变频器和低压变频器；二是中压变频器的电压等级；三是旁路问题，许多用户希望在变频器出现故障时，电机能直接接电网工作，即旁路工作。10 kV 电机接 10 kV 电网，没有问题。为了变频器合理，电机电压和电网电压不一样时如何也能旁路工作是待解决的一个大问题。

本文讨论基于现在电力电子器件水平。随器件水平提高，情况将随之变化。文中涉及的观点均为笔者个人观点，仅供参考。文中涉及的一些价格，均为作方案比较用的价格，不是实际购物价格。由于资料有限，这些价格可能误差较大，仅供参考。

## 2 中压变频和低压变频

我国目前 200 kW 以上的风机和泵多用中压电机拖动，在考虑变频调速方案时自然希望 200 kW 以上采用中压变频。以 200 kW 作为中低压分界是否经济合理是本文讨论的第一个问题。

过去以 200 kW 分界是考虑电机直接起动，起动电流为额定电流的 7~8 倍，10 kV/380 V 电力变压器最大容量为 2 000 kVA 左右，短路阻抗 6% 左右，起动时低压母线压降将限制在 5% 左右。再加大变压器容量，短路电流太大，低压开关难以承受。采用变频调速后起动电流被限制在额定电流内，中低压分界条件也应随之变化。西门子公司认为中压分界以 800~1 500 kW 为宜。对于调速性能要求不高、而经济性要求高的风机和泵类设备，考虑到电缆截面和根数、安装尺寸及损耗等因素，800~1 200 kW 可能更好一些；对于调速性能要求高的设备，功率可大一些，因为低压变频更成熟，工艺控制用的选件多。

常用的低压及中压变频器主回路结构如图 2 所示<sup>[2]</sup>，其中 a 为两电平线路（TWL），用于低压；b 为三电平线路（THL），用于中压；c 为分离直流电源多重化线路（SDM），也用于中压，图中下标 *n* 为单元串联数。比较三种线路可以看出，低压变频线路比中压简单得多。

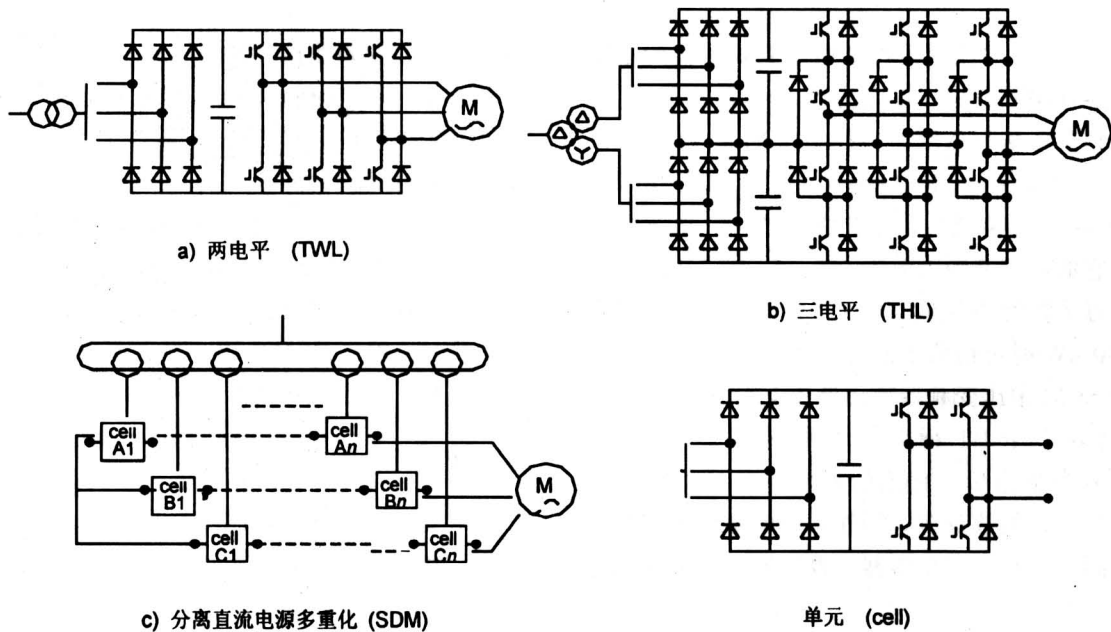


图 2 低压及中压变频主电路

Fig.2 Low and medium voltage inverters

现在变频器用的开关功率器件主要是 IGBT。低压 IGBT 电压为 1 200 V、1 700 V，电流为 800~2 400 A；高压 IGBT 电压为 3 300 V（已开发出 4.5 kV 及 6.2 kV 产品，但尚未工业实用），电流为 600~1 200 A。在选用器件时一般电压裕量为 2 左右，电流裕量为 1.6~2。表 1 列出了 380 V、660 V 及 2.3 kV 三种变频器使用的功率器件及变频器估计价。从表中看出：

1) 低压变频器 (TWL) 使用低压 IGBT，器

件便宜，400 kW 以下 IGBT 器件不并联，每台变频器有 6 个 IGBT，1 个整流桥。400 kW 以上为 IGBT 2 并，每台变频器有 12 个 IGBT，1 个整流桥。主回路功率器件少，价格低，功率越大每千瓦价越低：380 V 变频器大约为 900 元/kW（400 kW 以上）；660 V 变频器大约 700~800 元/kW；400 kW 以上时 660 V 比 380 V 更合算一些；380 V，800 kW 以上及 660 V，1 300 kW 以上为两变频器柜并联，就不合算了。

表 1 380 V、660 V 及 2.3 kV 变频器用功率器件及变频器估价表（未含进线变压器价）

Table 1 380 V, 660 V and 2.3 kV inverter devices and inverter prices

输出电压 /V	输出功 率/kW	输出电 流/A	IGBT		整流桥 数量	钳位二极 管数量	变流柜估计 价格/万元	备注
			规格	数量				
380 (TWL)	250	510	1 200 V, 1 200 A, 不并	6	1		20	
	400	690	1 200 V, 1 600 A, 不并	6	1		35	
	630	1 100	1 200 V, 1 200 A, 2 并	12	1		52	
	710	1 300	1 200 V, 1 800 A, 2 并	12	1		67	
	>800							2 台变频器并联
660 (TWL)	250	297	1 700 V, 800 A, 不并	6	1		22	
	400	452	1 700 V, 1 200 A, 不并	6	1		32	
	630	650	1 700 V, 1 000 A, 2 并	12	1		48	
	800	860	1 700 V, 1 200 A, 2 并	12	1		57	
	1 000	1 080	1 700 V, 1 800 A, 2 并	12	1		68	
	>1 300							2 台变频器并联
2 300 (THL)	630	200	3 300 V, 600 A	12	2	6	90	
	1 300	400	3 300 V, 1 200 A	12	2	6	140	
	2 000	600	3 300 V, 1 600 A	12	2	6	160	
2 300 (SDM)	315	100	1 700 V, 300 A	24	6		60	每相 2 桥串联
	630	200	1 700 V, 600 A	24	6		90	每相 2 桥串联
	1 300	400	1 700 V, 1 200 A	24	6		140	每相 2 桥串联

2) 2.3 kV 中压变频器是中压领域最低的电压等级，器件串联数少。以它为代表与低压变频器比较，来划分中压和低压的界线。2.3 kV THL 中压变频器使用 3.3 kV IGBT，器件贵，每台变频器 12 个 IGBT，2 整流桥，6 钳位二极管，功率器件数多。它的功率范围大致为 630~2 000 kW，功率越大，每千瓦价格越低。630 kW 时比低压高，大于 2 000 kW 时价格低于低压变频器。

3) SDM 中压变频器使用低压 IGBT 器件，2.3 kV 装置两个 IGBT 桥串联，共需 24 个 1 700 V IGBT，6 个整流桥。它用的器件类型虽然与低压变频器相同，但数量多。另外进线电源变压器需特殊的多副边移相干式变压器，也比低压变频器用的普通变压器贵。

变频器输入波形的  $dv/dt$  对电机安全运行影响很大，THL 线路使用 3 300 V IGBT，在器件开关过程中产生 1 800 V 左右的电压突变， $dv/dt$

高，一般在变频器输出侧需加装正弦波滤波器，大约增加 20 % 的价格。660 V 低压变频和 SDM 中压变频都用 1 700 V IGBT，在器件开关过程中产生 900 V 的电源突变，二者  $dv/dt$  相同，都只有 THL 的一半。低压电机本身绝缘水平较低，使用 660 V 变频器时最好加装  $dv/dt$  滤波器。

针对每个具体项目，在决定选用低压还是中压变频器时，除考虑上述因素外，还要考虑安装面积、电缆长度以及安装方便等因素。

### 3 中压变频器的电压等级

本文前面已经说明，由于有输入侧变压器，中压变频器和电机的电压不必和电网一致。电压等级究竟多大合适？国外中压变频器的电压等级有 2.3 kV，3 或 3.3 kV，4.16 kV，6 或 6.6 kV，10 kV。其中 10 kV 的很少用，主要是前 4 级。

中压变频器用的电力电子器件高压 IGBT 或

IGCT 的电压等级是 3.3 kV, 4.5 kV 和 6 kV。对于 THL 中压变频器, 器件承受的实际电压最大值

$$V_{max} = \frac{\sqrt{2} V_m}{\sqrt{3} \times 1.15} \quad (1)$$

式中  $V_m$ —电机额定电压; 1.15—引入三次谐波后变频器输出相电压幅值降低的系数。

器件电压

$$V_{dev} = KV_{max} \quad (2)$$

式中:  $K \approx 2$ , 为电压裕量。

对应于各电网电压等级的器件电压列于表 2。

表 2 THL 变频器器件电压

Table 2 Device rated voltage of THL inverters

输出电压/kV	2.3	3 (3.3)	4.16	6 (6.6)
器件电压/kV	3.3	4.5	6	9

现工业用高压 IGBT 电压为 3.3 kV, 正好用于 2.3 kV 变频器, 该器件电流为 600~1 600 A, 用于变频器可输出电流 200~600 A (有效值), 容量 800~2 400 kVA (630~2 000 kW)。对于 3 kV (3.3 kV) 和 4.16 kV 的变频器, 现在用 2 个 3.3 kV IGBT 串联, 器件数量增加 1 倍, 价格也增加很多, 少用为宜。对于 6 kV (6.6 kV) 变频器, 需 3 个 IGBT 串联, 技术尚不过关, 应避免用。现在工业用 IGCT 电压已达 4.5 kV 和 6 kV, 正好用于 3 kV (3.3 kV) 和 4.16 kV 变频器, 器件不串联, 数量少。4.5 kV 和 6 kV 的 IGBT 也已试制出, 不久将用于工业装置, 到那时再推荐 3 kV (3.3 kV) 和 4.6 kV 的 IGBT 变频器较合适。

SDM 中压变频器用低压 1 700 V IGBT, 每功率单元输出最大电压 800~900 V, 故变频器输出电压每增加 1 000~1 100 V, 单元串联数  $n$  就要加 1, 增加 3 个单元, 12 个 IGBT, 3 组整流桥。各电压等级所需的单元串联数  $n$  及器件数见表 3。

表 3 SDM 变频器单元串联数  $n$  及器件数

Table 3 Amount of device and cells in series of SMD inverters

输出电压/kV	2.3	3/3.3	4.16	6/6.6	10
单元串联数 $n$	2	3	4	6	10
IGBT 数量	24	36	48	72	120
整流桥数量	6	9	12	18	30

从原理上说 SDM 通过单元串联, 变频器输出电压不受器件电压限制, 可以较高。但提高电压的代价是器件数大量增加和可靠性降低。变频器的价

格是按单元数来计算的, 对于同样输出功率的变频器, 使用较高电压、较多单元所花的代价大于用较低电压、较少数量、电流较大单元的代价。也就是说在单元电流允许条件下选用尽可能低的电压等级, 例如同样 1 000 kVA 变频器, 选用 6 kV, 100 A 装置比选用 3 kV, 200 A 装置贵 15 万元左右。

### 4 变频器旁路

变频器旁路指在变频器出现故障时将电机直接接入电网, 恒速工作。如果电机电压和电网电压一致, 旁路不成问题。为了降低变频器造价, 电机电压低于电网电压后, 如何旁路, 是这里所要讨论的问题。

如果采用低压变频, 变频器输入交流电压与额定输出电压一样, 电机可以绕过变频器直接接低压 380 V 或 660 V 电源。

如果采用 THL 中压变频, 可以把输入变频器两副边串联起来向电机供电, 参见图 3。当三个转换开关接“1”时, 变频器工作; 当三个开关接“2”时旁路, 输入变压器的两组副边线电压各等于  $1.05 V_m / 2$  ( $V_m$  为电机额定输入电压), 并互差  $30^\circ$ , 把它们串起来后电压为  $1.05 V_m \cos 15^\circ = 1.01 V_m$ , 正好供电机恒速工作。

如果采用 SDM 变频器, 输入变频器副边太多, 无法通过改变接线来旁路变频器, 只能旁路出

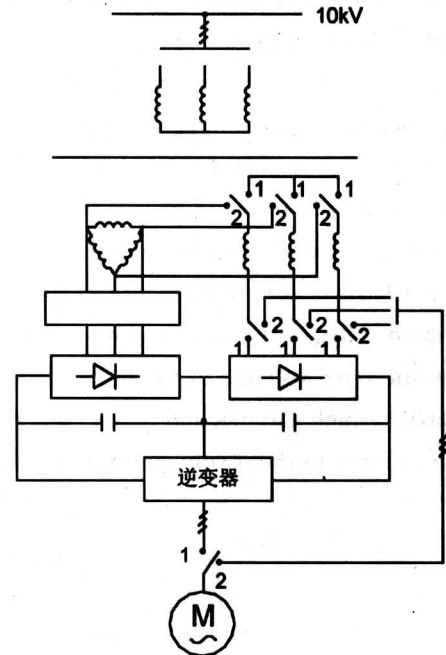


图 3 THL 变频器旁路接线

Fig.3 By-pass of a THL inverter

故障的单元,经触点将故障单元输出短路,单元中 IGBT 封锁。在这类变频器设计时已考虑了旁路单元的工况。如果一定要旁路变频器,只能另加一台备用降压变压器,这对于在一个电网上挂有多套变频器时是合理的。

设计旁路电路时需注意校验电机直接起动时的起动转矩。例如变压器短路阻抗为 6%,容量为 1.1 倍变频器容量,电机起动电流为 7 倍,则电机起动电压为  $0.72 V_m$ , 起动转矩为 0.52 倍额定起动转矩,它应大于负载转矩。若起动转矩不够,只能加大变压器容量或选用小短路阻抗变压器。

## 5 结论

1) 大中功率风机和泵传动功率在 200 kW 以上,其中大部分在 0.2~2 MW 范围中。采用变频调速可节约大量电能。

2) 我国目前 200 kW 以上电机多是中压电机,

现行中压电网多为 10 kV,选用 10 kV 直接变频从技术和经济角度看都不大合理。

3) 由于隔离及减少电网污染的需要,中压变频器输入侧都有变压器,因此电机和变频器电压没必要和电网一致,可以低于 10 kV。

4) 800~1 200 kW 以下的变频调速宜选用低压 380 V 或 660 V 电机及变频器。

5) 1 000~1 300 kW 以上的中压变频宜在器件电流允许条件下,选用尽可能低的电压等级,如 2.3 kV, 3 kV, 4.16 kV 及 6 kV 等。

6) 在电机电压低于电网电压情况下,也可以在变频器故障时,实现旁路工作。

### 参考文献

- [1] 钱照明,吕征宇,何湘宁. 电力电子器件的最新发展 [J]. 变频器世界,2001,(1): 4~10
- [2] 岳国良,齐玉峰,张建忠. 高压变频器及其在电网中的应用 [J]. 变频器世界,2000,(11): 3~6

## Reasonable Rated Voltage of High and Medium Power Adjustable-Speed Drives for Energy Saving

Ma Xiaoliang

(Tianjin Design & Research Institute of Electrical Drives, Tianjin 300180, China;  
School of Electrical Engineering & Energy, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract]. A large amount of energy will be saved if adjustable-speed drives are adopted by high and medium power pumps and fans. The power range of most of the drives is within 0.2~2 MW. The rated voltage of most of the motors in the power range is 10 kV because the power supply is 10 kV. The adjustable-speed scheme, a 10 kV motor is fed by a 10 kV inverter, is not reasonable because this kind of inverter consists of a lot of power electronic devices in series and its cost is high and reliability is poorer than lower voltage one. Owing to the existence of input transformer of the inverter, it is not necessary to ask for that the rated voltage of the motor and inverter is the same as power supply, i. e. a lower rated voltage can be used for the motor and inverter. The reasonable rated voltages of motors and inverters with different power grades are investigated and the by-pass methods when the rated voltages of the motors are different from power supply are discussed in this paper.

[Key words] high and medium power; adjustable-speed drives for energy saving; reasonable rated voltage; low voltage inverters; medium voltage inverters; by-pass