

关于电压型变频器直流环节滤波电容的计算方法

----天明伟业----

摘要：电压型变频器直流环节并入电容对整流电路的输出进行滤波，理论上电容值越大，电压纹波越小，但是从空间和成本上考虑并不能如此。详细论述了三相输入和单相输入变频器滤波电容的计算方法，为电压型变频器不同功率的负载所需滤波电容的选择提供了理论依据。最后通过实验证明了该算法可行、可靠，不仅保证了产品的性能，更节约了成本。

关键词：整流电路；电压型变频器；纹波

0 引言

虽然利用整流电路可以将交流电变换成直流电，但是在三相电路中这种直流电压或电流含有频率为电源频率 6 倍的电压或电流纹波。此外，变频器逆变电路也将因输出和载波频率等原因而产生纹波电压或电流，并反过来影响直流电压或电流的品质。因此，为了保证逆变电路和控制电路能够得到高质量的直流电压或电流，必须对直流电压或电流进行滤波，以减少电压或电流的脉动。

直流环节是指插在直流电源和逆变电路之间的滤波电路，其结构的差异将对变换器的性能产生不同的影响：凡是采用电感式结构，其输入电流纹波较小，类似电流源性质；凡是采用电容式结构，其输入端电压纹波较小，类似电压源性质。

对电压型变频器米说，整流电路的输出为直流电压，直流中间电路则通过大电解电容对该电压进行滤波；而对于电流型变频器米说，整流电路的输出为直流电流，中间电路则通过大电感对该电流进行滤波。

1 三相变频器直流中间电路电解电容的计算

1.1 变频器及直流中间电路结构框图

变频器及直流中间电路结构图如图 1 所示。

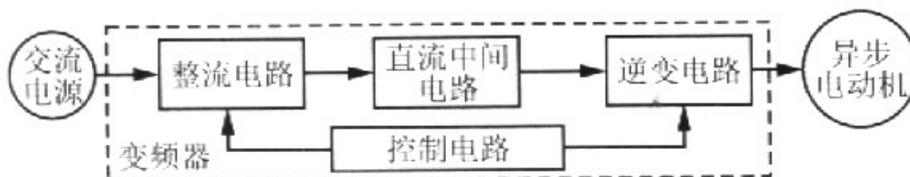


图 1 变频器及直流中间电路框图

1.2 三相输入及整流后的电压波形

三相输入线电压 220V 及整流后的电压波形如图 2 所示。

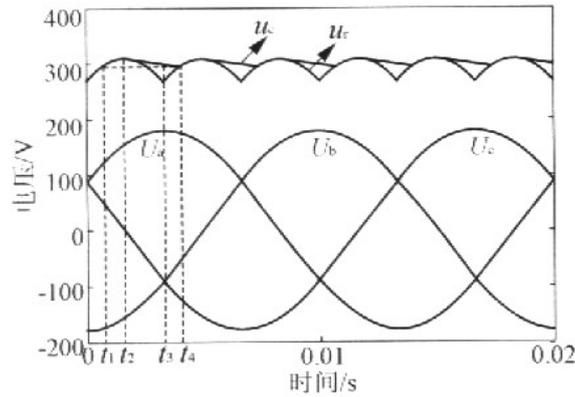


图 2 三相输入及母线电压波形

图 2 中， U_a 、 U_b 、 U_c 是三相三线制的三相输入相电压； u_c 是电容电压， u_r 是整流之后未加电容时的电压。

1. 3 分析过程

1. 3. 1 整流后电压的计算

由图 2 可知

$$U_a = \sqrt{2} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + 30^\circ) = \frac{\sqrt{6}}{3} U \sin(\omega t + 30^\circ)$$

$$U_b = \sqrt{2} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \sin(\omega t - 90^\circ) = \frac{\sqrt{6}}{3} U \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$U_c = \sqrt{2} \times \frac{U}{\sqrt{3}} \sin(\omega t - 210^\circ) = \frac{\sqrt{6}}{3} U \sin(\omega t - 210^\circ)$$

对于三相三线制输入线电压为 220V 系列变频器(以下简称 220V 系列)来说 $U=220V$ ；对于 440V 系列， $U=440V$ 。

$$\text{当 } \omega t \in \left(0, \frac{\pi}{3}\right) \text{ 时, } u_r = U_a - U_b$$

$$= \frac{\sqrt{6}}{3} U [\sin(\omega t + 30^\circ) - \sin(\omega t - 90^\circ)] \quad (1)$$

$$\text{整理得: } u_r = \sqrt{2} U \cos(\omega t - 30^\circ), \omega t \in \left(0, \frac{\pi}{3}\right) \quad (2)$$

1. 3. 2 等效电阻的计算

为计算方便，对于输出功率为 P 的逆变器，将其直流侧输入端阻抗用一个纯电阻 R 等效，则

$$R = \frac{U_{PN}^2}{P} \quad (3)$$

对于 220 V 系列变频器来说, $U_{PN}=220\sqrt{2}$ V,
而 440 V 系列变频器的 $U_{PN}=440\sqrt{2}$ V

1.3.3 电容的充放电过程分析

由于整流后的直流电压有波动, 假设 u_r 的波动幅度为 $a\%$, 则

$$u_{\min} = U_{PN}(1-a\%) \quad (4)$$

假设电路工作已经处于稳态, 电容两端的电压如图 2 所示, 在 t_2 时刻, 电容电压达到最大值。之后由于电源电压小于电容电压, 电容开始放电; 在 t_3 时刻, 当电源电压下降到最小值时, 电容电压依然大于电源电压, 电容继续放电; 在 t_4 时刻, 电源电压刚好等于电容电压, 此后电源给电容充电。在 t_4 时刻电容电压等于 $U_{PN}(1-a\%)$ 。

1.3.4 计算过程

由图 2 可知, 电容的放电时间为 $t_f=t_4-t_2$

$$\text{而 } t_4-t_2=(t_3-t_2)+(t_4-t_3)=(t_3-t_2)+t_1=\frac{T}{12}+t_1$$

若 $f=50$ Hz, 则 $T=0.02$ s

由上述分析可令

$$U_{PN}(1-a\%)=220\sqrt{2} \cos(\omega t-30^\circ), \omega t \in \left(0, \frac{\pi}{3}\right) \quad (5)$$

由式(5)知, 若 a 已知, 则可以解出 t_1 , 由此可以算出电容的放电时间 t_f

$$t_f = \frac{T}{12} + t_1 \quad (6)$$

滤波电容 C 向逆变器放电的等效电路如图 3 所示。

由图 3 得, $\tau=RC$, 假设初始状态为 $U_{\omega r}=\sqrt{2} U$, 则电容电压方程 $U_c=\sqrt{2} U e^{-\frac{t}{\tau}}$, 由以上分析可令

$$\sqrt{2} U e^{-\frac{t}{\tau}} > U_{PN}(1-a\%) \quad (7)$$

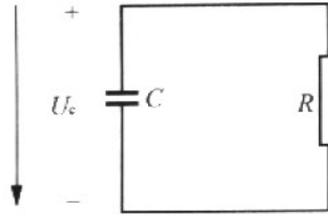


图3 滤波电容 C 向逆变器放电的等效电路

解得

$$C > \frac{t_f}{R \ln \left[\frac{\sqrt{2} U}{U_{PN}(1-\alpha\%)} \right]} \quad (8)$$

将 $U_{PN} = \sqrt{2} U$ 代入式(8)得

$$C > \frac{t_f}{R \ln \frac{1}{1-\alpha\%}} \quad (9)$$

例：以三相 220V 系列 2.2kW 变频器为例来计算其直流中间电路所需的电解电容。

已知， $U=220V$ ， $U_{PN}=310V$ ， $f=50Hz$ ，并假设 $\alpha=5$ ，

由式(3)得 $R = \frac{U_{PN}^2}{P} = \frac{310^2}{2200} \approx 43.682 \Omega$

由式(5)解得

$$t_1 = 6.5584 \times 10^{-4} \text{ s} \text{ 或 } t_1 = 2.677493 \times 10^{-3} \text{ s}$$

由图 2 知 $t_1 = 6.5584 \times 10^{-4} \text{ s}$

所以

$$t_f = \frac{T}{12} + t_1 = \frac{1}{600} + 6.5584 \times 10^{-4} \approx 2.3225067 \times 10^{-3} \text{ s}$$

将以上数据代入式(9)得到 $C > 1036.56 \mu\text{F}$

考虑实际电容容值大小，则可以选择用 3 个 $470 \mu\text{F}$ 的电解电容并联使用。

2 单相变频器直流中间电路电解电容的计算

这里单相输入的线电压的值仍与上述三相输入的相同。

由于三相变频器整流后的电压波形是六脉波；而单相变频器只有两个波头。

由式(2)可以算出

$$U_{\text{有效}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \times \int_0^{2\pi} \left(\sqrt{2} U \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \right)^2 d\omega t}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2}} U$$

所以 $U_{\text{IN}} = \sqrt{2} U_{\text{有效}} = \frac{\sqrt{6}}{3} U$

由式(3)、式(9)可以知道

$$C > \frac{t_f}{R \ln \frac{1}{1-a\%}} = \frac{t_f}{\frac{\left(\frac{\sqrt{6}}{3} U\right)^2}{P} \ln \frac{1}{1-a\%}}$$

$$= \frac{3Pt_f}{2U^2 \ln \frac{1}{1-a\%}} \quad (10)$$

对于单相 220V 系列 0.4kW 系列变频器来

说，若将 $a=5, U=220\text{V}, t_f \approx 2.322\ 506\ 7 \times 10^{-3}\text{s}, P=400\text{W}$ 代入得

$$C > \frac{3Pt_f}{2U^2 \ln \frac{1}{1-a\%}} = \frac{3 \times 400 \times 2.322\ 506\ 7 \times 10^{-3}}{2 \times 220^2 \times \ln \frac{1}{1-5\%}}$$

$$= 561.31\ \mu\text{F}$$

因此对于单相 220V 系列 0.4 kW 变频器，则选择用 3 个 220 μF 的电解电容并联使用。

3 实验结果

(1)三相输入 220V 系列 2.2kW 变频器在载波频率为 14.5 kHz、负载为满载、直流环节使用 3 个 470 μF 的电解电容并联的条件下，测得电容电压最大值和最小值分别为 312V 和 299V，平均值为 305V，纹波系数约为 4.26%；

(2)单相输入 220V 系列 0.4kW 变频器在载波频率为 14.5 kHz、负载为满载、直流环节使用 3 个 220 μF 的电解电容并联的条件下，测得电容电压最大值和最小值分别为 308V 和 294V，平均值为 301V，纹波系数约为 4.65%。

4 结语

变频器硬件回路的设计在考虑采用性能好的部件的同时更要注意使成本最低化。依靠经验而取的电容值一般会留很大的裕量，间接地增加了成本。本文关于直流中间电路电解电容的算法在实际应用中可行，并且可靠。通过理论计算，设计者可以根据不同电压等级、不同功率的负载选择相应的滤波电容。此算法已实际应用，并取得了一定的经济效益。