

谐波对电力电容器的影响

杨 季 忱

(电机系)

提 要

供电系统中的谐波电流影响电力电容器的运行特性,本文对这个问题进行了详细论述并提出防止电容器被谐波电流损坏的办法。结论是选择大约 $X_L = 0.06 \sim 0.05 X_C$ 的电抗并与电容器相串联。

关键词: 谐波 电力电容器

一、谐波电流在电网中的分布

一切产生谐波电流的装置可视为谐波恒流源,由它发送谐波电流向网络各处传播。电网各支路的谐波电流分布,取决于各支路谐波阻抗的大小,而与供电电源及负载功率的流动方向无关。各支路的谐波等值阻抗为:

$$R_n = R_1 \quad R_1 \text{ 为基波电阻} \quad n \text{ 为谐波次数}$$

$$X_{Ln} = n X_{L1} \quad X_{L1} \text{ 为基波感抗} \quad n \text{ 为谐波次数}$$

$$X_{Cn} = \frac{X_{C1}}{n} \quad X_{C1} \text{ 为基波容抗} \quad n \text{ 为谐波次数}$$

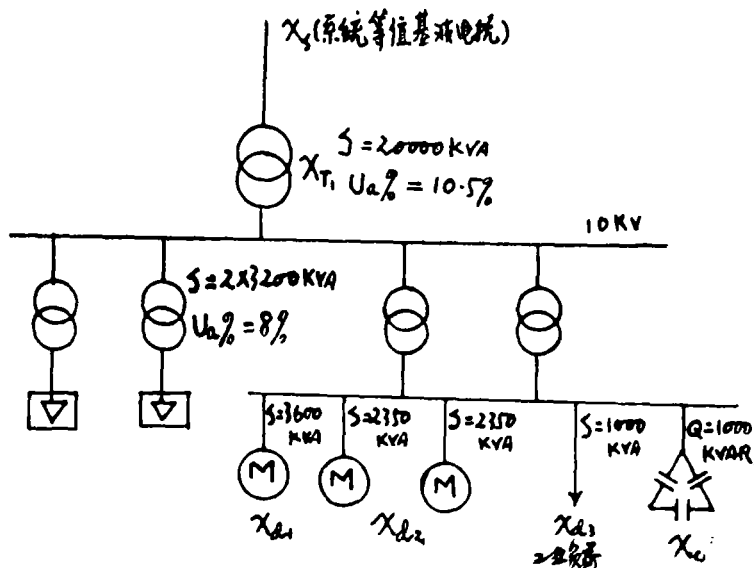


图 1

本文1986年12月20日收到

上面后两式表明电抗与频率成线性关系,这是理论上的数值。有人对电网的谐波阻抗作过研究,表明在低压电网中 $Z_n = nZ_1$,而在中压及高压电网中则有定的差异,这里不作详细的论述,采用理论上的数值。下面举一例说明如何制定谐波的等值电路,从而可看出谐波电流在网络中的分布。

某工厂供电如图1所示。图中标X均为各元件的基波电抗。其等值电路可表示如图2。

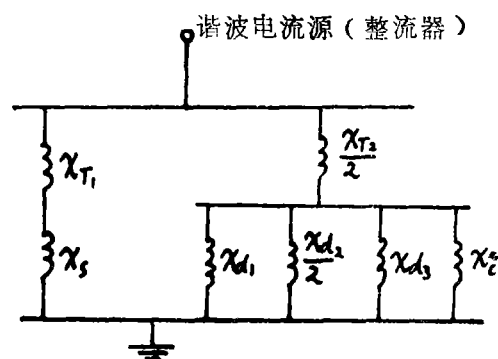


图 2

有效值的百分比,即:

$$DFI = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\%$$

系统中任一点P的谐波电压,等于在谐波等值回路中通过该点流入系统的谐波电流 I_{pn} 乘以该点至电源中性点(即假设的接地点)之间的每相谐波电抗,从而P点的谐波电压为:

$$V_{pn} = I_{pn} X_{pn}$$

电压畸变率为在电压波形中所有各次谐波电压(有效值)的均方根值与基波电压有效值的百分比,即:

$$DFV = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}{V_1^2}} \times 100\%$$

电压畸变率是电网供电质量的重要指标之一,对各级电压电网的允许电压畸变率极限值,在“电力系统谐波管理暂行规定”中,有明确的规定。

电压畸变率的计算,实际上谐波次数无需取 ∞ ,但上限究竟取多少合适,要视具体情况。一般说来,应注意电缆线路和架空线路的多少。我国当前规定上限取为19次。

二、谐波电流对电网运行的影响

我国农电网络多由大系统供电,一般经110KV线路送电至某县区变电站,降压后再用35KV线路送至各乡镇变电所,然后再降压用10KV线路送至各农村配电变压器。如果系统中有谐波电流,这样,就等同于在各级变电站的母线上有一个恒流谐波电源;如母线上接有补偿无功的电力电容器,谐波电源、农电网络和电容器组合起来的等值电路可如图3所示:

谐波电流除使供电质量变坏,产生种种不良影响外,尚有对容性负载产生谐振现象的严重问题。正常情况下,农电网络的等值基波感抗 X_L 和电容器的基波容抗 X_C 在数值上相差悬殊,不发生谐振,但感抗与容抗的频率特性相反,可能在某次谐波下,两者数值接近,产生

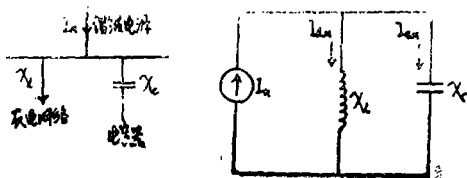


图3

由等值电路图可知，在 n 次谐波时：

$$I_{cn} = \frac{X_{Ln}}{X_{Ln} - X_{cn}} I_n = \frac{nX_L}{nX_L - \frac{X_c}{n}} I_n = K_{cn} I_n$$

$$K_{cn} = \frac{nX_L}{nX_L - \frac{X_c}{n}} = \frac{I_{cn}}{I_n} > 1$$

K_{cn} 为电容器回路谐波电流的放大系数。由上式看 $I_{cn} > I_n$ ，谐波电流的放大作用，是形成电容器过负荷的主要原因。当 $X_{Ln} = X_{cn}$ 时，产生并联谐振，这时 $nX_L = \frac{X_c}{n}$ 或 $n = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$ ，电网中低次谐波的谐振现象，特别危险。在低压供电系统中，电阻不应忽视，当考虑电阻时，等值电路如图4，这时

$$\begin{aligned} I_{cn} &= \frac{R + jX_{Ln}}{R + j(X_{Ln} - X_{cn})} I_n \\ &= \frac{R + jnX_L}{R + j(nX_L - \frac{X_c}{n})} I_n \\ K_{cn} &= \frac{R + jnX_L}{R + j(nX_L - \frac{X_c}{n})} = \frac{I_{cn}}{I_n} > 1 \end{aligned}$$

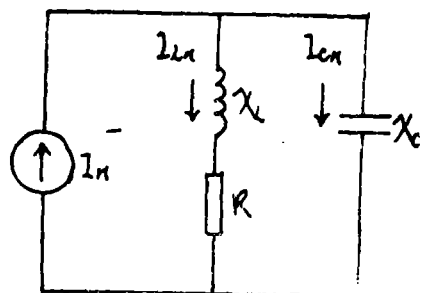


图4

I_{cn} 仍大于 I_n ，但比忽略电阻时要小些。

当谐振时， $nX_L = \frac{X_c}{n}$ ，则 $K_{cn} = \frac{R + jnX_L}{R} = 1 + j\frac{nX_L}{R}$ 或 $K_{cn} = 1 + \tan\phi_L \approx \tan\phi_L$ 。

ϕ_L 称为供电系统的谐波阻抗角，一般可取 85° ，重负荷时，可取 75° 。在正常运行情况下，一般不发生谐振，但在改变电网结线或电源、负荷等改变运行方式时，就有可能发生谐振。

2、串联谐振

当电容器前串有感抗 X_L （例如电容器前有一段线路或降压变压器等）时，可发生串联谐振现象，等值电路图如图5

设在 n 次谐波下发生串联谐振，

谐振现象，造成严重后果。

1、并联谐振

在图三所示的等值电路中， I_n 为谐波电流源， X_L 为农电网的等值基波感抗， X_c 为电容器的基波容抗。

则 $X_{L_n} = X_{C_n}$ 或

$$n_c X_L = \frac{X_c}{n_c} \quad n_c = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}}$$

理论上, 由于 $X_{L_n} = X_{C_n}$, 全部谐波电流 I_n 几乎全由谐振环节通过, 电抗元件和电容元件两端都可能发生过电压。整流装置的谐波电流, 随基波电流而变。串联谐振时过压、过流情况, 随整流负荷大小而波动。

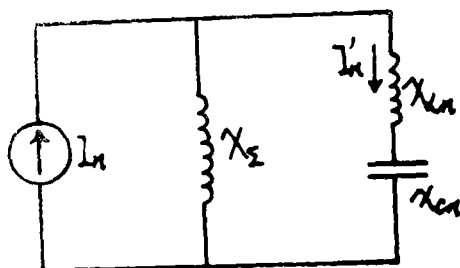


图5

三、防止和消除谐振的措施

1、电力电容器的临界容量

在 n_b 次谐波时, 发生谐振现象的电容器组容量, 称为该次谐波下的电力电容器组的临界容量。根据谐波的条件有

$$n_b X_L = \frac{X_c}{n_b} \quad \begin{array}{l} X_L \text{ 为供电系统的等值每相基波感抗} \\ X_c \text{ 为电力电容器组的等值星形每相基波容抗} \end{array}$$

设 Q 为电力电容组的容量, V_L 为线电压, 则,

$$X_c = \frac{V_L^2}{Q}$$

因此, 对应于 n_b 次谐波时, 电力电容器组的临界容量为:

$$Q_{Lj} = \frac{V_L^2}{n_b^2 X_L}$$

上式表明, 在一定的供电系统等值感抗 X_L 时, 电容器组的临界容量低次谐波的较高次谐波的大。因此, 接入的电容器组实际容量若大于低次谐波的临界容量, 必然大于任何高次谐波的临界容量, 从而在任何高次谐波下都不可能与供电系统发生并联谐振现象, 反之, 若接入的电容器组实际容量小于低次谐波下的临界容量, 则可能在某一高次谐波下发生并联谐振。一般工业多采用六相整流装置, 其最低次谐波数为5次, 因此, 应确定5次谐波时的电容器组临界容量, 考虑 X_L 的变化, 并要有一定的储备系数。电容器组的实际容量应取为 $Q = K_c Q_{Lj}$, K_c 值应取1.3~1.5。

实际上, 为避免谐振计算出的临界容量往往超过补偿无功所需要的容量, 还可能虽然避免了谐振, 但由于电容器对谐波电流的放大作用, 使电容器发生不能容许的过负荷, 仍不能运行。因此, 较大容量的电容器一般不直接接入母线, 而采用串联电抗器, 将在下面详述。

2、电容器组串接电抗器防止谐振

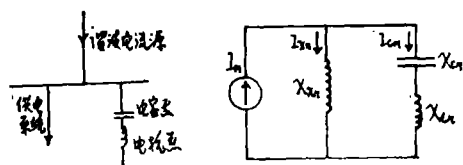


图6

用串联电抗器限制谐波电流、防止谐振是常被采用的办法, 但电抗器的电抗值不能随意确定。根据等值电路

$$I_{cn} = \frac{X_{xn}}{X_{xn} + (X_{Ln} - X_{cn})} I_n = \frac{nX_x}{nX_x + (nX_L - \frac{X_c}{n})} I_r$$

$$I_{xn} = \frac{X_{Ln} - X_{cn}}{X_{xn} + (X_{Ln} - X_{cn})} I_n = \frac{nX_L - \frac{X_c}{n}}{nX_x + (nX_L - \frac{X_c}{n})} I_n$$

以上二式看,有下列四种情况:

$$(1) \quad nX_L - \frac{X_c}{n} > 0 \quad K_{cn} = \frac{I_{cn}}{I_n} < 1$$

电容器支路呈感性

$$(2) \quad nX_L = \frac{X_c}{n} \quad K_{cn} = \frac{I_{cn}}{I_n} = 1$$

电容器支路相当于调谐 n 次的串联共振 $L-C$ 滤波器。电容器支路短接 n 次谐波电流。

$$(3) \quad |nX_x| < |nX_L - \frac{X_c}{n}| < 0 \quad K_{xn} = \frac{I_{xn}}{I_n} > 1$$

电容器支路呈容性,供电系统侧谐波电流增大。

$$(4) \quad |nX_x| \approx |nX_L - \frac{X_c}{n}| < 0 \quad K_{cn} = \frac{I_{cn}}{I_n} \rightarrow \infty$$

电容器支路呈容性,电容器支路和供电系统发生并联谐振,两者谐波电流都很大。

串联电抗器的选取原则是在最低次整流谐波次数下,争取符合情况(1),即最低次谐波情况下,电容器支路呈感性;要避免情况(2)和(3),绝对防止情况(4)。

串联电抗器选取的步骤如下:

(1) 使电容器 $L-C$ 支路的串联谐振次数 n_c 低于最低次整流谐波次数 n_{min} ,即

$$n_c = \sqrt{\frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_L}} < n_{min}$$

一般取 $n_c = 0.8 \sim 0.88 n_{min}$ 对六相整流装置 $n_{min} = 5$ 取 $n_c = 4 \sim 4.4$

(2) 电容器支路无串联电抗器时,与供电系统发生并联谐振的次数为 $n_b = \sqrt{\frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_x}}$ 。

(3) 电容器支路串联电抗器后,与供电系统发生并联谐振的次数为:

$$n_{cb} = \sqrt{\frac{\bar{X}_c}{\bar{X}_x + \bar{X}_L}} = \sqrt{\frac{\bar{X}_c}{\frac{\bar{X}_c}{n_b^2} + \frac{\bar{X}_c}{n_c^2}}} = \frac{n_c n_b}{\sqrt{n_c^2 + n_b^2}}$$

若取 $n_c = 4 \sim 4.4$ 从上式看 $n_{cb} < 4 \sim 4.4$

这样保证串联电抗器后,电容器支路与供电系统发生并联谐振的次数 $n_{cb} < n_c$ 。

(4) 选取电抗器的电抗值

$$\text{取 } \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = 0.8 \sim 0.88 n_{\min} \quad \text{则 } X_L = (1.3 \sim 1.55) \frac{X_c}{n_{\min}^2}$$

取 $n_{\min} = 5$ $X_L = 0.06 \sim 0.05 X_c$ 。即电抗器的基波感抗值应为电容器基波容抗值的 5%~6%

(5) 检查过电压

在电容器支路中串联任何感抗值都会使电容器基波端电压升高。感抗值愈大, 电容器的端电压愈高。在供电系统的 $X_s \neq 0$ 的情况下, 电容器基波端电压 V_{c1} 较母线上的电压 V_s 升高的近似值为:

$$K_{cv} = \frac{V_{c1}}{V_s} = \frac{X_c}{X_c - X_L} \approx \frac{X_c}{X_c - \frac{X_c}{n_c^2}} = \frac{n_c^2}{n_c^2 - 1}$$

当取 $X_L = 1.5 \frac{X_c}{n_{\min}^2}$ 时, 则电容器基波端电压升高系数 K_{cv} 如下表:

最低整流谐波次数 n_{\min}	3	5	7	9	11
$K_{cv} = \frac{V_{c1}}{V_c}$	1.20	1.07	1.03	1.02	1.01

因此, 选择电容器的额定电压应稍高于母线电压。如母线电压为 6.3KV, 应选 6.6KV 电容器; 10.5KV, 应选 11KV 电容器。

当电容器串接电抗器时, 与端电压升高的同时, 基波电流也随之升高。如果电容器的额定电压按母线电压选取, 则由于端电压升高, 电容器实际补偿的无功功率与额定无功功率之比, 也约为:

$$\frac{Q}{Q_n} \approx \frac{n_c^2}{n_c^2 - 1} > 1$$

由上式看, 电容器支路串联电抗器后, 其补偿无功功率反有所增加。然而电抗器感抗值的不适当增加, 会由于过电压而使电容器受损伤。

Harmonic's Influence on Power Capacitor

(Elegraph engineering department)

Yang ji chen

Abstract

Harmonic currents in power supply system influence the operating characteristic of the power capacitor. This paper made an analysis of this subject in detail and suggested method to prevent damage of the capacitor by harmonic currents. The conclusion is that to select a reactor about $X_L = 0.06 \sim 0.05 X_c$ connected in series with the capacitor.

Key Words: harmonic, power capacitors