

DOI: 10.7667/PSPC150887

电容器串联电抗消除谐振的最大值最小优化

邓朴¹, 刘晓波², 皮显松¹, 王丰元¹, 刘凯³

(1. 贵州电网公司电网规划研究中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025;
3. 都匀供电公司, 贵州 都匀 558000)

摘要: 针对变电站并联电容器合理的串联电抗率, 建立了适用于 220 kV 和 110 kV 变电站的全参数谐波电路和模型。该模型包含变电站短路阻抗、变压器、电容器、负荷以及谐波源, 提出了以负荷母线谐波电压放大倍数等反映谐振程度的目标函数。采用最大值最小优化方法, 使目标函数在全部电网状态空间中的最大值通过调整电容器串联电抗率优化后达到最小, 并对电容器电抗率的技术经济性进行了分析。计算结果表明: 12%电抗率消除谐振的效果最好, 并具有普适性; 4.2%~4.5%电抗率的消除谐振效果其次, 但具有更好技术经济价值, 适应于大多数的 220 kV 和 110 kV 变电站。

关键词: 谐波; 谐振; 电容器; 谐波放大; 电抗率; 谐波阻抗; 最大值最小优化

Minimax optimization of reactance connected in series on capacitor to eliminate resonance

DENG Pu¹, LIU Xiaobo², PI Xiansong¹, WANG Fengyuan¹, LIU Kai³

(1. Power Grid Planning and Research Center, Guizhou Power Grid Corporation, Guiyang 550002, China;
2. Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. Duyun Electric Power Bureau, Duyun 558000, China)

Abstract: For the reasonable series reactance rate in capacitor of substations, the full parametric harmonic circuit and model for 220 kV and 110 kV substations are established, which consists of short impedance, transformer, capacitor, load, and harmonic source, and the resonance objective function that reflect the degree of resonance such as harmonic voltage amplification factor on load bus, etc. is given. With minimax optimization, the maximum values of objective function in all the power grid parameter space are minimized by changing reactance rate, and the technical and economic characteristics of the reactance rate of the capacitor are analyzed. The calculation results show that resonance is eliminated with best effect and generality by the rate 12%; resonance is eliminated with second effect by rate 4.2% ~ 4.5%, but the rate 4.2% ~ 4.5% one has better technical and economic value and is suitable for most of 220 kV and 110 kV substation.

Key words: harmonic; resonance; capacitor; harmonic amplification; reactance ratio; harmonic impedance; minimax optimization

0 引言

在电网谐波较大地区, 电力并联电容器容易发生谐波谐振, 不但导致并联电容器的损害, 而且造成公用连接点(PCC)谐波电压放大, 恶化了电网电能质量。

电容器谐波谐振是由以下两个因素共同作用的结果: 一是电容器阻抗与电网阻抗存在着参数配合, 使谐振频率与整数倍谐波频率相重合; 二是变电站注入了较大的、与谐振频率一致的谐波分量。

为防止电容器谐波谐振一般采取两种方法, 一是破坏谐振的参数配合条件; 二是通过滤波器等治

理措施减小谐波。由于谐波治理措施经济代价较大, 常常采用第一种方法。

电容器串联一个电抗器, 可以避开电容器谐振。由电容元件和串联电抗元件构成电容器装置的电抗率——即串联电抗感抗与电容器元件容抗的比, 是防止电容器谐振的关键因素。

针对电容器串联电抗率的问题, 国内外曾进行过大量的分析和研究。

文献[1-22]假设谐波电流源直接注入到接入电容器装置的母线, 形成谐波电流源、电容器装置阻抗和母线短路阻抗相互并联的等值电路, 构成了电容器谐振的基本模型, 见图 1。

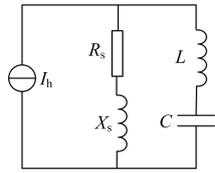


图 1 电容器谐振等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of resonance caused by capacitor

文献[1]论述了串联谐振和并联谐振的机理；文献[2-3] 论述电容器装置能够同时形成串联谐振和并联谐振；文献[4]论述了通过调整电抗率可使谐振频率避开谐波频率；当电抗率增大时，可以使串联与并联谐振点向着低频方向移动，反之电抗率减小时向高频方向移动；文献[5]以 IEEE30 节点系统为例，研究了导纳矩阵的频率特性，得出系统串联谐振的模式。

文献[6-13]通过电路阻抗参数的计算分析，改变电抗率，从而避开电容器装置并联谐振的频率点，达到防止电容器谐振的目的；也形成了比较一致的结论：4.5%~6%电抗率适于抑制 5 次谐波，12%电抗率适于抑制 3 次谐波。文献[6-11]以谐波测量数据为依据，对谐振条件计算后再选择电抗率，文献[12-13]提出采用不同电抗率的电容器装置，混合装在变电站内，以抑制各种谐波。文献[14-15] 针对 IEEE 14 节点的典型系统，以节电电压总畸变率为目标函数，对 0%、6%和 4.5%串联电抗率进行优化，得出 4.5%最优的结论。

上述文献提出的方法，是电网确定条件下的特定分析方法，需要在电网参数确定并测量到谐波数值后，才能计算确定电抗率。由于各个变电站电网参数不同，提出的电抗率也就不同，这就导致国内电容器电抗率的数值繁多，较典型的电抗率是 4.5%、6%、12%，也有采取 5%、7%、13%等电抗率。

笔者认为，现有文献的研究基础是基于谐波源从变电站主变的低压侧注入的电路与模型分析得到的，如果谐波源是从主变压器高压侧注入的背景谐波，或非线性负荷形成的谐波源从主变中压侧注入，谐波等值电路就不能简化成图 1 的电路，图 1 电路仅适合于非线性负荷谐波源从两绕组变压器低压侧注入这种情况。

此外，在电容器设计前，现有文献和标准要求测量变电站电容器接入处的背景谐波，这在新建变电站的电容器设计工作中难以做到。

为解决新建变电站电容器设计的串联电抗率选择问题，需要对串联电抗率消谐能力的一般性，即

包含电网各种因素条件下的普适性进行研究。为此，本文针对 220 kV 和 110 kV 变电站并联电容器的谐振问题，建立了并联电容器、变压器、负荷、电网短路阻抗和谐波源的普适性模型(此普适性模型适用于 110 kV 和 220 kV 电压等级的谐波谐振研究)，分析了模型各个参数的范围，提出了反映电容器装置谐振水平和危害程度的目标函数，在模型的全部电网状态空间中对目标函数进行关于电抗率的最大值最小优化，得出了具有普适意义的优化的电抗率。

1 电路、模型和参数

1.1 谐振电路

根据典型的 220~110 kV 变电站的设备和电气接线，建立包含电容器装置、变压器、负荷、电网短路阻抗的变电站等值谐振电路。变压器考虑三绕组和双绕组两种类型，电容器接入到主变压器低压侧，三绕组变压器的负荷母线是中压侧母线，两绕组变压器的负荷母线是低压侧母线。谐波源采用恒流源模型^[16-17]，可以从主变高压侧母线注入的背景谐波，也可以是注入负荷母线的非线性负荷谐波。因而形成 4 种谐振等值电路，见图 2。

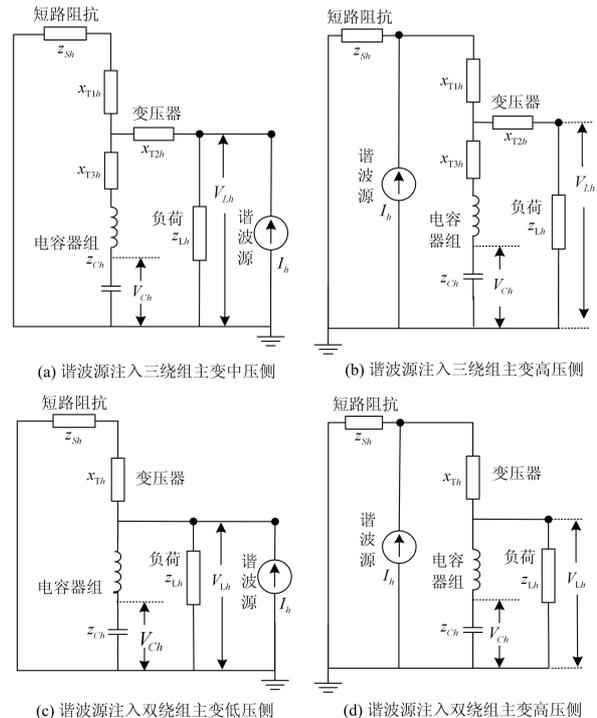


图 2 谐波注入方式与谐振等值电路

Fig. 2 Harmonic injection mode and resonance equivalent circuit

1.2 谐波阻抗模型和参数范围

谐振电路包含了短路阻抗、变压器阻抗、电容器

装置阻抗和负荷阻抗。忽略电气元件的集肤效应^[23], 将这些阻抗考虑为纯电阻、纯电容或纯电感性。电容性的谐波阻抗为基波阻抗除以谐波次数, 电感性谐波阻抗为基波阻抗乘以谐波次数。

为了将电路的物理量转换为电气设计要素, 采用如下基准进行标么变换。

基准容量: 电容器装置实际投入的容量 Q 。

基准电压: 主变压器实际运行时的调压分头对应的电压。

图 2 电路中各个谐波阻抗标么值推导如下。

(1) 系统短路阻抗的谐波阻抗

$$Z_{sh} = \frac{0.15}{\sqrt{0.15^2 + 1}} \frac{(Q/S_T)}{(S/S_T)} + j \frac{h}{\sqrt{0.15^2 + 1}} \frac{(Q/S_T)}{(S/S_T)}$$

式中: 0.15 是短路阻抗中的电阻与电感之比, 这个比值对电容器谐振影响很小; h 为谐波次数; S/S_T 为变压器短路比, 其中 S 为主变压器高压侧短路容量, S_T 为变压器容量。在多台变压器的变电站, n 台变压器可等值为一台单变压器, 等值容量为 $n \times S_T$ 。通过对大量 220 kV 和 110 kV 变电站的 S/S_T 数据进行统计, 可以确定 220 kV 和 110 kV 变电站的 S/S_T 数值在 3.6~100 之间。

Q/S_T 是实际投入运行的电容器补偿率, 根据《电力系统电压和无功电力技术导则》^[24], 变电站电容器补偿率应小于 0.3。因此 Q/S_T 在 0~0.3 之间。

(2) 双绕组变压器谐波电抗

可采取谐波次数乘以变压器基波电抗作为变压器谐波电抗^[25]。

$$X_{T1h} = j \cdot 0.14 \cdot \delta \cdot h \cdot Q/S_T$$

常数 0.14 是双绕组变压器阻抗电压的典型数值, δ 为变压器阻抗变动范围, 220 kV 和 110 kV 变电站的各类变压器的阻抗电压是不同的, 接入的各个分接头也会对实际的阻抗产生影响, 实际变压器阻抗变动范围 δ 在典型数值的 0.7~1.3 倍之间。

(3) 三绕组变压器谐波电抗

$$X_{T1h} = j \cdot 0.14 \cdot \delta \cdot h \cdot Q/S_T$$

$$X_{T2h} = j \cdot (-0.007) \cdot \delta \cdot h \cdot Q/S_T$$

$$X_{T3h} = j \cdot 0.09 \cdot \delta \cdot h \cdot Q/S_T$$

公式中的常数 0.14、-0.007、0.09 是变压器高、中、低三个绕组的阻抗电压的典型数值。 δ 是如前所述的变压器阻抗变动范围。

(4) 电容器装置谐波阻抗

$$Z_{ch} = j \cdot (xh - \frac{1}{h})$$

x 是电容器的串联电抗率, 在 0~0.13 之间进行研究。

(5) 负荷谐波阻抗

$$R_L = \frac{Q/S_T}{\cos \phi \cdot \gamma}$$

$$X_{Lh} = j \cdot \frac{Q/S_T}{\sqrt{1 - \cos^2 \phi \cdot \gamma}}$$

$$Z_{Lh} = \frac{R_L \cdot X_{Lh}}{R_L + X_{Lh}}$$

γ 是主变负荷率, 即负荷容量与主变压器容量比, 反映负荷的大小。范围在 0.1~1.1 之间。 $\cos \phi$ 为负荷功率因数, 功率因数最小的负荷是交流电弧炉, 功率因数可以低至 0.7^[26-27]。因此 $\cos \phi$ 范围在 0.7~1 之间。

(6) 谐波源的电流谐波模型

$$I_h = I_1 \cdot a_h$$

式中: I_1 为非线性负荷的基波电流; a_h 为谐波源的 h 次谐波电流含量, 各次 a_h 的数值均在 0~1 之间。

1.3 模型的变量说明

电抗率 x 是求解的控制变量, 其余变量是电网的状态参数, 这些状态变量可组成状态矢量 z

$$z = (\delta, \gamma, S/S_T, Q/S_T, \cos \phi, a_2, a_3, \dots, a_n)$$

$$z \in D$$

$$D = \left\{ \begin{array}{l} (\delta, \gamma, S/S_T, Q/S_T, \cos \phi, a_2, a_3, \dots, a_n) \\ 0.7 \leq \delta \leq 1.3, \quad 0.1 \leq \gamma \leq 1, \quad 3 \leq S/S_T \leq 100 \\ 0 \leq Q/S_T \leq 0.3, \quad 0.7 \leq \cos \phi \leq 1, \quad 0 \leq a_2, a_3, \dots, a_n \leq 1 \end{array} \right\}$$

组成状态矢量 z 的每一个变量都有确定的取值范围, z 所在的电网状态空间 D 是确定的。

2 反映电容器谐振水平的目标函数

2.1 负荷母线的电压总谐波畸变率放大倍数 λ

λ 是计及电容器谐振与不计电容器谐振(即是电容器不投入)的负荷母线电压总谐波畸变率之比, 衡量电容器谐振对公共连接点(PCC)的谐波电能质量总体的恶化程度。

$$\lambda(x, z) = \frac{THD_L}{\lim_{Q/S_T \rightarrow 0} (THD_L)} \quad (1)$$

THD_L 为负荷母线电压总谐波畸变率

$$THD_L = \frac{\sqrt{\sum_h V_{Lh}^2}}{V_1}$$

V_1 是负荷母线基波电压, V_{Lh} 是负荷母线的 h 次谐波电压, 见图 2。 V_{Lh} 的解析式容易从谐波电流源、短路阻抗, 变压器阻抗、电容器装置电抗和负荷阻抗推导得出。

THD_L 受谐波源和电容器谐振因素(即阻抗的参数配合)的双重影响。

在电容器投入很小的情况下,电容器与系统电抗参数难以配合,谐振程度很小,在电容器补偿率 $Q/S_T \rightarrow 0$ 的极限状态下,不会发生电容器谐振。因此 $\lim_{Q/S_T \rightarrow 0} (THD_L)$ 的数值仅受谐波源的影响,而不受电容器谐振影响。

如图3(a)电路中的 λ 解析式为

$$\lambda(x, \dot{z}) = \frac{\sqrt{\sum_h a_h^2 |Z_{Lh} \parallel [X_{T2h} + (Z_{Sh} + X_{T1h}) \parallel (Z_{Ch} + X_{T3h})]|^2}}{\sqrt{\sum_h a_h^2 |Z_{Lh} \parallel (X_{T2h} + Z_{Sh} + X_{T1h})|^2}}$$

其中符号“ \parallel ”表示阻抗的并联运算,可发现 λ 是以自变量 (x, \dot{z}) 组成的多元函数,其余电路的 λ 解析式也容易推导,本文略去。

注意到,式(1)的分式中,负荷母线基波电压 V_1 和非线性负荷基波电流 I_1 已被约分消除, λ 是以自变量 (x, \dot{z}) 构成的多元函数。

2.2 电容器元件的电压总谐波畸变率放大倍数 μ

μ 是计及电容器装置谐振与不计谐振时,电容器元件上的电压总谐波畸变率之比,衡量电容器装置谐振对电容器元件过压的影响,反映电容器装置谐振对设备自身的危害程度。

$$\mu(x, \dot{z}) = \frac{THD_C}{\lim_{Q/S_T \rightarrow 0} (THD_C)} \quad (2)$$

其中

$$THD_C = \frac{\sqrt{\sum_h V_{ch}^2}}{V_{c1}}$$

THD_C 为电容器元件上的电压总谐波畸变率。 V_{c1} 是电容器元件上基波电压, V_{ch} 是电容器元件上的 h 次谐波电压,见图2。

THD_C 受谐波源和电容器装置谐振因素(即阻抗参数配合)的双重影响;

$\lim_{Q/S_T \rightarrow 0} (THD_C)$ 为不计电容器谐振时的电容器元件上的电压总谐波畸变率,该极限存在且容易推导。

根据标准《标称电压1000V以上交流电力系统用并联电容器第1部分:总则》^[28],电容器元件的长时间工作电压应满足 $V_C \leq 1.1V_N$, V_C 为电容器运行电压,是交流电压的方均根值, V_N 为电容器设计的额定电压,以此为据,文献^[29]得出 $THD_C \leq 0.458V_{c1}$ 的结论。

本文以最严峻的运行条件进行研究,考虑了电容器接入母线的最高电压偏差,根据《电力系统电

压和无功电力技术导则》规定,35kV电压偏差应在-3%~7%之内,10kV等级的电压偏差应在 $\pm 7\%$ 内,电容器最高电压偏差为1.07。以此标准规定,核算电容器元件可承受的电压总谐波畸变率 THD_C 。

$$\sqrt{1.07^2 + (THD_C \cdot 1.07)^2} \leq 1.1$$

$$THD_C = 23.85\%$$

《公用电网谐波》标准^[24]规定,电容器装置所接入的35~10kV母线的电压总谐波畸变率应小于5%。由于23.85%是5%的4.77倍,在变电站谐波电能质量合格的情况下,如果电容器元件总谐波畸变率放大倍数 μ 小于4.77倍,电容器元件长时间安全运行是有保障的。

3 目标函数的最大值最小优化

3.1 关于电抗率 x 的目标最大值函数

目标函数 $\lambda(x, \dot{z})$ 是控制变量 x 和状态矢量 \dot{z} 的多元函数, $\dot{z} \in D$, D 是电网状态空间。

对控制变量 x 的某一个值,在状态空间 D 内存在一个 \dot{z} ,使 $\lambda(x, \dot{z})$ 具有最大值, x 与这个最大值的映射,构成目标最大值函数 $\lambda_{\max}(x)$

$$\lambda_{\max}(x) = \max_{\dot{z} \in D} [\lambda(x, \dot{z})]$$

$\lambda_{\max}(x)$ 最大值函数是以 x 为自变量的单值函数。

类似地,可以定义关于电抗率 x 的目标最大值函数 $\mu_{\max}(x)$

$$\mu_{\max}(x) = \max_{\dot{z} \in D} [\mu(x, \dot{z})]$$

3.2 目标函数的最大值最小优化

对目标函数 $\lambda(x, \dot{z})$ 关于 x 最大值最小优化表示为

$$\min_x [\lambda_{\max}(x)], \text{ 即是 } \min_x \left[\max_{\dot{z} \in D} \lambda(x, \dot{z}) \right]$$

优化解释:通过串联电抗率 x 优化后,使目标函数 $\lambda(x, \dot{z})$ 在全部电网状态空间中的最大值的数值达到最小。

类似地,对目标函数 $\mu(x, \dot{z})$ 的关于 x 最大值最小优化表示为

$$\min_x [\mu_{\max}(x)], \text{ 即是 } \min_x \left[\max_{\dot{z} \in D} \mu(x, \dot{z}) \right]$$

3.3 最大值最小优化的数值求解方法

(1) 计算目标最大值函数 $\lambda_{\max}(x)$ 和 $\mu_{\max}(x)$

对 x 的某一个值,求解目标函数 $\lambda(x, \dot{z})$ 或 $\mu(x, \dot{z})$ 在状态空间 D 中的最大值。

目标函数 λ 和 μ 是多变量非线性函数,它的最大值或最小值求解的最优化方法称为非线性规划方法,为得到非线性规划的最优解,要求 λ 和 μ 在多维空间 D 中是可微的凸函数。

λ 和 μ 是连续可微的,但在多维电网状态空间 D 中不是凸函数。为求解最大值,采用工程数值计算中常用网格法,算法简述如下:

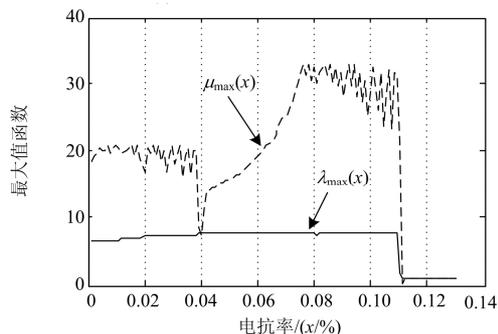
将 D 构成的多维空间划分为多个细小的子空间,保障 λ 和 μ 在具有最优解的子空间中是凸函数。

取子空间中的中心值作为计算的初始点,采用广义既约梯度法(GRG 法)的并行算法^[30],计算出 λ 和 μ 在各个子空间中的各个最大值。

取出所有子空间各个最大值中的最大值,这个值及对应的 x 值,构成了最大值函数曲线中的一个点。

对 x 从 0 至 0.13 之间的点逐个计算,可绘出 $\lambda_{\max}(x)$ 和 $\mu_{\max}(x)$ 曲线,见图 3。

受计算机的性能限制,谐波含量的模型的参数数量需要简化,由于电网中 4 次及以上的偶次谐波和 21 次及以上的谐波含量很小,可以忽略不计,因此,本文仅考虑对电容器谐振产生较大影响的 2、3、5、7、9、11、13、15、17 和 19 次谐波含量。因此,状态矢量 \dot{z} 简化为 15 个变量。



(d) 谐波源注入双绕组主变高压侧

图 3 目标最大值函数曲线

Fig. 3 Curves of objective maximum functions

$$\dot{z} = (\delta, \gamma, S/S_T, Q/S_T, \cos\phi, a_2, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}, a_{13}, a_{15}, a_{17}, a_{19})$$

$$\dot{z} \in D$$

本文计算时,将多维空间 D 划分为 4 251 万个子空间。使最优解所在的子空间中,目标函数是凸函数。

(2) 电抗率 x 的最大值最小优化的最优解

x 的最大值最小优化值,就是目标最大值函数 $\lambda_{\max}(x)$ 和 $\mu_{\max}(x)$ 的最小值,从图 3 中可清晰观察出电抗率 x 的最大值最小优化数值在 11%~13%之间,此区域 $\lambda(x, \dot{z})$ 和 $\mu(x, \dot{z})$ 的最大值均为 1。

4 电抗率的技术经济性分析

4.1 消谐性能最优的 12%电抗率

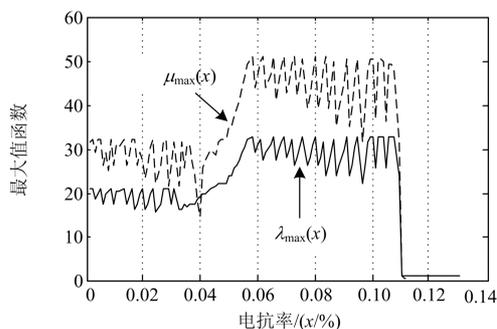
从图 3 可知,电抗率的 x 最大值最小优化数值在 11%~13%的区域内,两个目标函数最大值均为 1,即是电网参数 \dot{z} 在整个电网状态空间 D 内, λ 和 μ 均小于等于 1,这意味着,采用这样电抗率的电容器装置,当电容器装置投入时,只会减小而不会放大谐波。更重要的是,它适应于 220 kV 及 110 kV 变电站的所有参数条件,具有普适的性质。

考虑到电容器容量在制造精度上的最大偏差可达 $\pm 5\%$,串联电抗器容量在制造精度上的偏差为 0%~5%,电抗率在制造上的相对误差会达到 -5%~10%,电抗率设计为 12%是合适的。

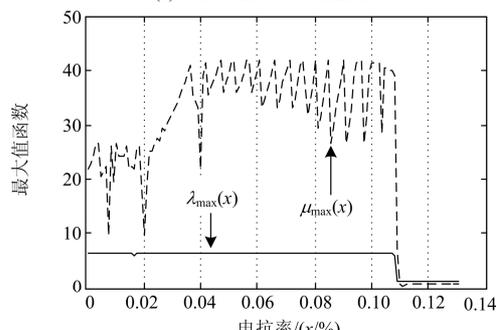
4.2 4.2%~4.5%电抗率应用范围分析

图 3 可发现次优的电抗率是 4%,但电抗率稍有变化就有可能导致谐振程度增加,4%的电抗率并不具有普适性的应用价值。

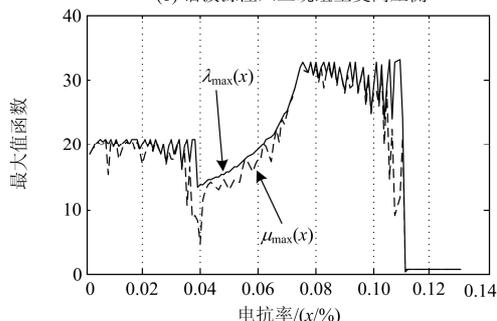
仔细研究发现,变压器短路比 S/S_T 和电容补偿率 Q/S_T ,对目标函数影响很大,在 $S/S_T \geq 15$ 且 $Q/S_T \leq 0.2$ 新的参数范围下,再次计算 $\lambda_{\max}(x)$ 和 $\mu_{\max}(x)$,曲线见图 4。可发现电抗率在 3.9%~5%区域下的目标最大值函数会降低,塌陷成一个缺口,这个缺口具有应用价值。



(a) 谐波源注入三绕组主变中压侧



(b) 谐波源注入三绕组主变高压侧



(c) 谐波源注入双绕组主变低压侧

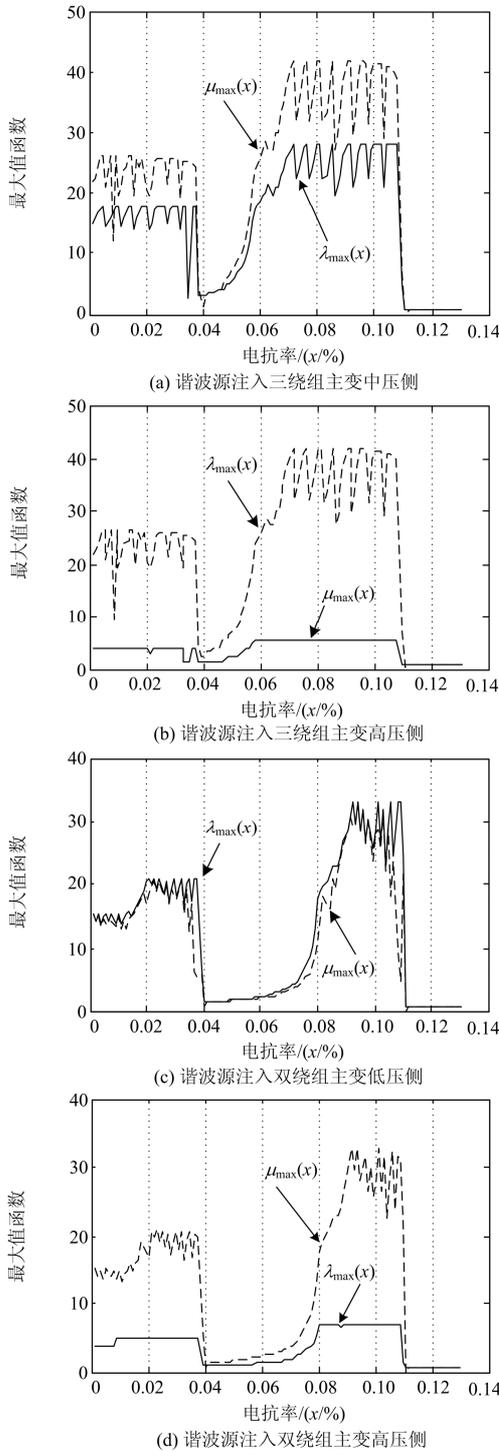


图 4 $S/S_T \geq 15$ 且 $Q/S_T \leq 0.2$ 时目标最大值函数曲线

Fig. 4 Curves of objective maximum functions while $S/S_T \geq 15$ and $Q/S_T \leq 0.2$

考虑电容器元件、电抗器元件阻抗在制造上的偏差，次优的电抗率宜设计为 4.2%，这与 4.5% 典型电抗率的数值非常接近，差别极小。数值结果见表 1。

表 1 $S/S_T \geq 15$ 且 $Q/S_T \leq 0.2$ 时最大值最小优化

Table 1 Minimax optimization while $S/S_T \geq 15$ and $Q/S_T \leq 0.2$

谐波源注入点	目标最大值函数	最优点 $x=12\%$	次优点 $x=4.2\% \sim 4.5\%$	$x=6\%$
三绕组变压器	$\lambda_{\max}(x)$	0.997	1.89	18.85
中压侧	$\mu_{\max}(x)$	0.980	4.05	26.06
三绕组变压器	$\lambda_{\max}(x)$	1.000	1.673	5.42
高压侧	$\mu_{\max}(x)$	0.980	4.05	26.06
双绕组变压器	$\lambda_{\max}(x)$	0.997	1.775	2.48
低压侧	$\mu_{\max}(x)$	0.987	1.76	2.29
双绕组变压器	$\lambda_{\max}(x)$	1.000	1.297	1.50
高压侧	$\mu_{\max}(x)$	0.988	1.76	2.48

注意到，表 1 中的电抗率为 4.2%~4.5% 时 μ 数值小于 4.77，根据本文 2.2 的分析，在变电站谐波电能质量合格的情况下，电容器元件长时间安全运行是有保障的。

绝大多数变电站参数满足 $15 \leq S/S_T$ 且 $Q/S_T \leq 0.2$ 的应用条件，尤其是 220kV 变电站更是如此。

4.3 6%电抗率的问题

国内 220 kV~110 kV 变电站采用 6%电抗率的电容器装置较多，但它不是优化数值，尤其在三绕组变压器的变电站，6%电抗率的电容器装置存在强度较大谐振。

在文献[31]中，总结了华北电网电容器装置运行情况，发现电抗率为 4.5% 的谐波放大现象远少于 6%，并特别指出该发现缺乏原理上的印证。本文对此给出了原理上的说明。

4.4 电抗率 12%与 4.5%的经济性对比

电抗率 x 越大，电容器装置容量损失就越大，电抗元件和电容器元件的额定电压和电流也要提高到 $1/(1-x)$ 倍，这又带来了制造成本的增加。串联电抗器的电能损耗很大，以大量使用的干式空心串联电抗器为例，损耗率可达到容量的 2.4%，电抗率增加所造成的电能损失是不能忽略的。

以 3 500 利用小时，20 年的生命周期进行成本分析，可以发现 12%电抗率电容器装置的综合成本，是 4.5%电抗率电容器的 2.6 倍，因此采用 12%电抗率的代价是巨大的。

5 结论

本文针对 220 kV 和 110 kV 变电站并联电容器的谐振问题，建立了并联电容器、变压器、负荷、电网短路阻抗和谐波源的普适性模型，与传统模型相比，不仅可以适用于谐波源从主变高压侧或中压侧注入的情况，而且可以很好的解决新建变电站电

容器设计的电抗率选择问题, 能适用于 110 kV 和 220 kV 电压等级的谐波谐振研究。

通过以上模型的分析, 4.2%~4.5%的电抗率具有优良的技术经济性, 消谐性能仅次于 12%电抗率。在电能质量合格的、且电容补偿率 $Q/S_T \geq 0.2$ 、且短路比 $S/S_T \leq 15$ 的变电站, 应采用 4.2%~4.5%电抗率, 大多数 220 kV~110 kV 变电站满足这一条件。

12%的电抗率具有最优的消除谐振性能, 并具有普适性, 但经济性不如 4.2%~4.5%电抗率。在谐波电能质量超标的变电站、或为大容量非线性负荷专供的变电站、或电容补偿率 $Q/S_T > 0.2$ 、或短路比 $S/S_T < 15$ 的变电站, 电抗率可设计为 12%。

6%的电抗率无论是消谐性能还是制造与运行成本, 均不及 4.2%~4.5%优良; 在三绕组变压器的变电站, 6%电抗率的电容器装置还存在强度较大谐振; 因此 220 kV~110 kV 变电站的电容器装置不宜设计为 6%电抗率。

参考文献

- [1] 董国震, 和敬涵. 电力系统局部电路谐波谐振产生原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(1): 77-80.
DONG Guozhen, HE Jinghan. Causal analysis and countermeasure on harmonic resonance in local circuit of electric power systems[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(1): 77-80.
- [2] BAGGINI A, HANZELKA Z. Handbook of power quality[M]. Italy: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
- [3] WAKILEH G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [4] 于兴林, 李慧敏, 李天云. 基于 EEMD 和 TLS-ESPRIT 的谐波间谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 67-72.
YU Xinglin, LI Huimin, LI Tianyun. A harmonic and inter-harmonic detection method based on EEMD and TLS-ESPRIT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 67-72.
- [5] 刘书铭, 李陈莹, 李琼林, 等. 电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 21-27.
LIU Shuming, LI Chenying, LI Qionglin, et al. Characteristics analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 21-27.
- [6] 史承逵. 电网电容器组谐波谐振和谐波放大的研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(7): 36-38.
SHI Chengkui. Study on harmonic resonance and harmonic enlargement of power network capacitor bank[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(7): 36-38.
- [7] 李国庆, 彭石, 张少杰, 等. 变压器与并联电容器的铁磁谐振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 26-32.
LI Guoqing, PENG Shi, ZHANG Shaojie, et al. Analysis of ferromagnetic resonance between transformer and shunt capacitor[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 26-32.
- [8] 雷赛衡, 鲁铁成, 张博, 等. 配电网无功补偿电容器组串联电抗器的选择[J]. 高电压技术, 2004, 30(10): 29-31.
LEI Saiheng, LU Tiecheng, ZHANG Bo, et al. Selection of series reactors in reactive compensation capacitors device in power distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(10): 29-31.
- [9] 田友元. 电力系统并联电容器运行的谐波问题[J]. 东北电力技术, 1996(2): 1-6.
TIAN Youyuan. Harmonic problems in operation of power system shunt capacitor[J]. Northeast Electric Power Technology, 1996(2): 1-6.
- [10] 张志丰, 肖立业, 邱清泉, 等. 一种改进串联谐振型限流器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 169-177.
ZHANG Zhifeng, XIAO Liye, QIU Qingquan, et al. An improved series-resonant type fault current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 169-177.
- [11] 俞勇杰. 串联电抗器的谐波抑制与电抗率选择[J]. 电气应用, 2005, 24(3): 74-77.
YU Yongjie. Harmonics wave restraining of serial reactor and selection of reactance rate[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(3): 74-77.
- [12] 任桂周, 常思勤. 一种基于超级电容器组串并联切换的储能系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 187-195.
REN Guizhou, CHANG Siqin. An energy storage system based on series-parallel switchover of ultra-capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 187-195.
- [13] 陈伯胜. 串联电抗器抑制谐波的作用及电抗率的选择[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 92-95.
CHEN Bosheng. Harmonics restraining function of serial reactor and selection of reactance rate[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 92-95.
- [14] 王星华, 余欣梅. 电容器组串联电抗率优化选择模型和算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(16): 42-47.
WANG Xinghua, YU Xinmei. Optimal configuration of series reactors in capacitor banks[J]. Power System

- Protection and Control, 2008, 36(16): 42-47.
- [15] GB/T 30841-2014 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
GB/T 30841-2014 Chinese standard SN for books[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [16] HIYAMA T, HAMMAM M S A A, ORTMEYER T H. Distribution system modelling with distributed harmonic sources[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1297-1304.
- [17] 赵勇, 张涛, 李建华, 等. 一种新的谐波源简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 46-50.
ZHAO Yong, ZHANG Tao, LI Jianhua, et al. Study on harmonic resonance and harmonic enlargement of power network capacitor bank[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 46-50.
- [18] 艾永乐, 王玉栋, 都静静, 等. 基于 LTS 初值的稳健回归的谐波发射水平评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 99-105.
AI Yongle, WANG Yudong, DU Jingjing, et al. A method for assessing harmonic emission level based on robust regression of LTS initial value[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 99-105.
- [19] 张民, 何正友, 高仕斌. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 21-28.
ZHANG Min, HE Zhengyou, GAO Shibin. Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 21-28.
- [20] 王嘉毅, 张延迟, 杨宏坤, 等. 基于蒙特卡洛法风电场谐波叠加可靠性评估[J]. 电器与能效管理技术, 2015(22): 67-73.
WANG Jiayi, ZHANG Yanchi, YANG Hongkun, et al. Harmonic superposition reliability evaluation in wind farm based on Monte-Carlo method[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2015(22): 67-73.
- [21] 雷颖, 范伟强, 牛帅, 等. 复合型电能质量调节装置的研制[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 150-153.
LEI Ying, FAN Weiqiang, NIU Shuai, et al. Development of composite power quality regulation device[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 150-153.
- [22] 陈子辉, 吴智影, 刘勇浩, 等. 两起补偿电容组谐波事件的原因分析[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 48-51.
CHEN Zihui, WU Zhiying, LIU Yonghao, et al. Cause analysis of two compensation capacitor group harmonic events[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 48-51.
- [23] CIGRE Working Group 36-05. AC system modeling for AC filter design — an overview of impedance modeling[J]. Electric, 1996(164): 133-151.
- [24] SD325-89 电力系统电压和无功电力技术导则(试行) [S]. 北京: 能源部, 1989.
- [25] 刘书铭, 李琼林, 陈栋新, 等. 中高压配电网非线性用户的电能质量特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 150-155.
LIU Shuming, LI Qionglin, CHEN Dongxin, et al. Study of power quality characteristics of nonlinear electric user in medium-high voltage distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 150-155.
- [26] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
ZHANG Peng, LI Hongbin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [27] GB/T 11024.1—2010 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 11024.1—2010 Chinese standard SN for books[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [28] GB/T14549—1993 中国标准书号[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
GB/T 14549—1993 Chinese standard SN for books[S]. Beijing: China Standard Press, 1993.
- [29] 陈晓宇, 郑建勇, 梅军. 基于 LC 振荡频率变化量的电容器组早期故障在线智能预警方法及其实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 144-149.
CHEN Xiaoyu, ZHENG Jianyong, MEI Jun. Power capacitor banks failure warning method based online intelligence LC oscillation frequency variation and its implementation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 144-149.
- [30] BYRD R H, HRIBAR M E, NOCEDAL J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming[J]. SIAM Journal on Optimization, 1999, 9(4).
- [31] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

收稿日期: 2015-05-27; 修回日期: 2015-12-07

作者简介:

邓朴(1963-), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电力系统稳定控制和电能质量; E-mail: 2410406553@qq.com
刘晓波(1964-), 女, 通信作者, 硕士, 副教授, 研究方向为电能质量和高电压技术; E-mail: 799797284@qq.com
皮显松(1959-), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为继电保护和电网规划。Email: pixs@im.gzwy.csg

(编辑 张爱琴)