

基于 V/V 接线变压器的铁路功率调节器容量配置和能量优化补偿策略

张鑫, 江全元

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对高速铁路牵引供电系统的谐波、负序问题, 提出一种采用铁路功率调节器(RPC)补偿装置的能量优化补偿策略。研究了优化补偿情况下 RPC 装置谐波和负序电流补偿量的检测方法。针对 RPC 的补偿能量, 对 RPC 进行最优稳态功率分析, 提出了 3 个补偿指标: 有功补偿度 γ 、无功补偿角度 φ 、谐波补偿度 ψ 。采用粒子群优化(PSO)算法计算 RPC 最小补偿能量下所需的 γ 、 φ 和 ψ , 通过对 γ 、 φ 、 ψ 的控制实现 RPC 的最优能量控制。采用能量优化补偿方法对 RPC 进行容量配置, 并针对补偿的实时性要求, 提出了一种工程应用方法。仿真结果表明, 所提出的能量优化补偿策略可以减小 RPC 的补偿容量, 提高了补偿装置的经济性。

关键词: 铁路功率调节器; 负序电流; 谐波电流; 能量优化; 容量配置; V/V 接线变压器; 补偿

中图分类号: TM 76

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.01.018

0 引言

电力机车负荷具有非线性、不对称和波动性的特点^[1], 会将产生的谐波和负序电流注入到电力系统中。随着高速铁路的快速发展, 电力机车的运行对电网电能质量的影响也日益加剧。采用相序轮换、提高系统电压等级等方法的治理效果有限, 因此高速铁路的电能质量问题成为国内外研究的热点^[2-11]。

目前对电气化铁路谐波、负序和无功问题, 主要采用投切电容器或者 SVC 等补偿装置^[2-3]来完成, 但对无功容易产生过补偿, 且对谐波和负序的补偿效果不佳。

铁路功率调节器 RPC (Railway static Power Conditioner)^[5-6]是一种能够综合补偿谐波、负序和无功的装置, 由日本学者首次提出。现有的利用 RPC 的综合补偿方法, 牵引变压器多采用阻抗匹配平衡变压器, 通过调整控制策略, 使牵引变压器二次侧两相负荷大小相等、功率因数相同, 即可满足一次侧负荷对称的要求^[12]。已有研究 RPC 在 Scott 接线变压器情况下的能量优化问题, 由于负序和无功电流的补偿各不影响, 控制策略中可以单独考虑负序或无功的补偿度^[13]。而对于 V/V 变压器下的 RPC 研究较少。文献^[14-15]研究了高速铁路采用 V/V 牵引变压器的情况下, 利用 RPC 进行负序和谐波电流综合治理的方法, 均完全补偿了谐波和负序电流, 但是 RPC 所需容量较高。

本文研究了优化补偿情况下, RPC 装置谐波和负序电流补偿量的检测方法。完全补偿是指将谐波

和负序电流尽量消除的补偿方式, 优化补偿是指将谐波和负序电流减小到满足国标要求的补偿方式, 从而减小装置补偿所需能量。针对 RPC 的补偿能量, 本文提出了 3 个补偿指标, 即有功补偿度 γ 、无功补偿角度 φ 、谐波补偿度 ψ ; 对 RPC 进行最优稳态功率分析, 采用粒子群优化(PSO)算法^[16]计算出 RPC 最小补偿能量下所需的 γ 、 φ 和 ψ , 通过对这三者的控制实现 RPC 的最优能量控制。采用能量优化补偿方法对 RPC 进行容量配置, 并针对补偿的实时性要求, 提出了一种工程应用方法。仿真结果表明, 本文提出的能量优化补偿策略可以减小 RPC 的补偿容量, 提高装置的经济性。

1 RPC 补偿的原理

RPC 补偿装置结构图如图 1 所示。系统电压为 220 kV, 高速铁路牵引变压器采用 V/V 接线方式, 两供电臂接触线额定电压为 27.5 kV。定义图中右侧供电臂为 α 供电臂, 左侧供电臂为 β 供电臂。RPC

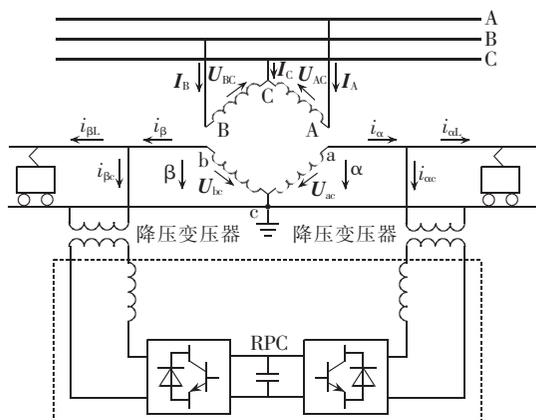


图 1 RPC 装置结构图

Fig.1 Topology of RPC

收稿日期: 2012-10-12; 修回日期: 2013-11-20

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAG12A09)

Project supported by the National Science and Technology Support Program of China(2009BAG12A09)

补偿装置通过降压变压器连接到 2 个供电臂。RPC 的 2 个电压源变流器通过直流电容给 2 个变流器提供直流电压。通过控制 RPC 来实现谐波、负序的综合补偿。

假设系统电压为理想电压源,一次侧三相电压 $U_A、U_B、U_C$ 分别为:

$$\begin{cases} U_A = U e^{j0^\circ} \\ U_B = U e^{-j120^\circ} \\ U_C = U e^{j120^\circ} \end{cases} \quad (1)$$

其中, U 为 A、B、C 三相相电压有效值。

设 V/V 接线变压器变比为 k , 则可得到 2 个牵引供电臂电压 $U_\alpha、U_\beta$ 分别为:

$$\begin{cases} U_\alpha = U_{ac} = \frac{1}{k} U_{AC} = \frac{\sqrt{3}}{k} U e^{-j30^\circ} \\ U_\beta = U_{bc} = \frac{1}{k} U_{BC} = \frac{\sqrt{3}}{k} U e^{-j90^\circ} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $U_{AC}、U_{BC}$ 分别为牵引变压器一次侧 AC、BC 相间线电压。

高速铁路采用交直交电力机车,为了分析方便,假设负荷功率因数近似为 1^[14],则补偿前 $\alpha、\beta$ 两供电臂基波电流 $I_{\alpha 0}、I_{\beta 0}$ 为:

$$\begin{cases} I_{\alpha 0} = I_{\alpha L} = I_{\alpha 0} e^{-j30^\circ} \\ I_{\beta 0} = I_{\beta L} = I_{\beta 0} e^{-j90^\circ} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $I_{\alpha 0}、I_{\beta 0}$ 为补偿前 $\alpha、\beta$ 两供电臂基波电流有效值, $I_{\alpha L}、I_{\beta L}$ 为负荷基波电流。

牵引变压器一次侧电流 $I_{A0}、I_{B0}$ 分别和二次侧电流 $I_{\alpha 0}、I_{\beta 0}$ 同相位。由式(1)~(3)可得补偿前的电压、电流关系,如图 2 所示,补偿前 A、B、C 三相电流 $I_{A0}、I_{B0}、I_{C0}$ 不平衡,存在负序电流, I_{A0} 滞后 U_A 30° , I_{B0} 超前 U_B 30° 。

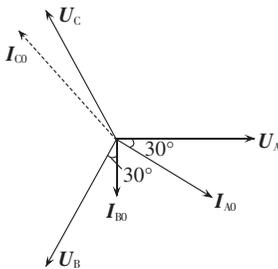


图 2 补偿前电压、电流的相量图

Fig.2 Phasor diagram of voltage and current before compensation

要使补偿后三相电流 $I_A、I_B、I_C$ 平衡,则补偿后 $I_A、I_B$ 应分别和 $U_A、U_B$ 同相位且大小相等。完全补偿后的三相电流相量图^[15]如图 3 所示,补偿可分为有功补偿和无功补偿,有功补偿的补偿电流方向和 $I_{A0}、I_{B0}$ 方向平行,补偿量为 $\Delta I_{I\alpha}、\Delta I_{I\beta}$,无功补偿的补偿电流方向和 $I_{A0}、I_{B0}$ 方向垂直,补偿量为 $\Delta I_{Q\alpha}、\Delta I_{Q\beta}$ 。

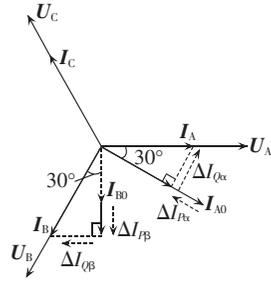


图 3 完全补偿后电压、电流相量图

Fig.3 Phasor diagram of voltage and current after complete compensation

设 $P_{\alpha 0}、P_{\beta 0}$ 分别为补偿前 $\alpha、\beta$ 两供电臂的负荷基波有功功率。根据补偿前后牵引供电系统提供给负荷总有功功率不变的原理,完全补偿需要补偿的有功量 $\Delta P_\alpha、\Delta P_\beta$ 的绝对值大小相等,且和为零,分别为:

$$\begin{cases} \Delta P_\alpha = 0.5(P_{\beta 0} - P_{\alpha 0}) \\ \Delta P_\beta = 0.5(P_{\alpha 0} - P_{\beta 0}) \end{cases} \quad (4)$$

完全补偿需要补偿的无功量 $\Delta Q_\alpha、\Delta Q_\beta$ 为:

$$\begin{cases} \Delta Q_\alpha = (P_{\alpha 0} + \Delta P_\alpha) \tan 30^\circ \\ \Delta Q_\beta = (P_{\beta 0} + \Delta P_\beta) \tan 30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

由图 3 可见完全补偿后三相电流 $I_A、I_B、I_C$ 平衡,大小相等,且相互相差 120° 。

2 补偿装置的能量优化

2.1 负序补偿的能量优化

采用 V/V 接线牵引变压器情况下,正序电流和负序电流的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3k} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} & e^{j90^\circ} \\ e^{-j30^\circ} & e^{-j90^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, $a = e^{j120^\circ}$ 。

根据 GB/T15543《电能质量 三相电压不平衡》,设公共连接点(PCC)的正序阻抗与负序阻抗相等,则牵引负荷引起的 PCC 处负序电压不平衡度 ε_{U2} 计算公式为:

$$\varepsilon_{U2} = \frac{\sqrt{3} I_2 U_L}{S_k} \times 100\% \quad (7)$$

其中, U_L 为牵引网额定电压,单位为 kV; S_k 为 PCC 的三相短路容量,单位为 $MV \cdot A$; I_2 为电流的负序值,单位为 A。

由式(7)可得:

$$I_2 = \frac{\varepsilon_{U2} S_k}{\sqrt{3} U_L} \quad (8)$$

RPC 完全补偿负序电流所需能量较高,经济性较差,实际中可仅补偿到满足国标要求。GB/T15543 规定:接于 PCC 的每个用户引起该点负序电压不平

衡度允许值一般为 1.3%。考虑一定的补偿裕度,可令补偿后电压不平衡度小于国标规定。对于特定的牵引供电系统, U_L, S_k 已知,即可由式(8)得到补偿后的负序电流目标值 I_2^* 。

采用优化补偿时电压、电流关系如图 4 所示,补偿前电流为图 2 中对应的 I_{A0}, I_{B0} , 补偿后电流为 I'_A, I'_B , 有功电流补偿量为 $\Delta I'_{P\alpha}, \Delta I'_{P\beta}$, 无功电流补偿量为 $\Delta I'_{Q\alpha}, \Delta I'_{Q\beta}$ 。

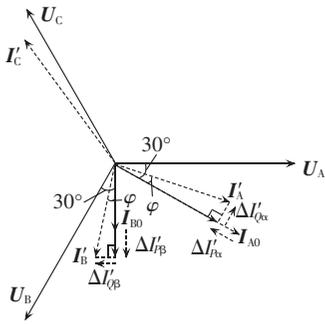


图 4 优化补偿后电压、电流相量图

Fig.4 Phasor diagram of voltage and current after optimal compensation

令 $m = P_{\alpha 0} + P_{\beta 0}, n = P_{\alpha 0} - P_{\beta 0}$, 则:

$$\begin{cases} P_{\alpha 0} = U_{\alpha} I_{\alpha 0} = (m+n)/2 \\ P_{\beta 0} = U_{\beta} I_{\beta 0} = (m-n)/2 \end{cases} \quad (9)$$

考虑能量优化补偿情况时,定义 2 个补偿指标,分别为有功补偿度 γ 、无功补偿角度 φ ,其中 $\gamma \in [0, 1]$, $\varphi \in [0, \pi/6]$ 。定义 φ 为 I'_A 和 I_{A0} (或 I_{B0} 和 I'_B)之间的夹角。需要补偿的有功量 $\Delta P'_{\alpha}, \Delta P'_{\beta}$ 的绝对值大小相等,且和为零。定义 γ 为:

$$\gamma = \frac{\Delta P'_{\alpha}}{\Delta P'_{\alpha}} = \frac{\Delta P'_{\beta}}{\Delta P'_{\beta}} \quad (10)$$

有功量 $\Delta P'_{\alpha}, \Delta P'_{\beta}$ 分别为:

$$\begin{cases} \Delta P'_{\alpha} = -0.5\gamma n \\ \Delta P'_{\beta} = 0.5\gamma n \end{cases} \quad (11)$$

无功量 $\Delta Q'_{\alpha}, \Delta Q'_{\beta}$ 分别为:

$$\begin{cases} \Delta Q'_{\alpha} = (P_{\alpha 0} + \Delta P'_{\alpha}) \tan \varphi \\ \Delta Q'_{\beta} = (P_{\beta 0} + \Delta P'_{\beta}) \tan \varphi \end{cases} \quad (12)$$

α 供电臂需要补偿基波能量为:

$$\Delta S_{\alpha} = \sqrt{\Delta P_{\alpha}^{\prime 2} + \Delta Q_{\alpha}^{\prime 2}} = 0.5\sqrt{(\gamma n)^2 + [m + (1-\gamma)n]^2 \tan^2 \varphi} \quad (13)$$

β 供电臂需要补偿基波能量为:

$$\Delta S_{\beta} = \sqrt{\Delta P_{\beta}^{\prime 2} + \Delta Q_{\beta}^{\prime 2}} = 0.5\sqrt{(\gamma n)^2 + [m + (\gamma-1)n]^2 \tan^2 \varphi} \quad (14)$$

RPC 补偿需要的总的基波能量 S'_1 为:

$$S'_1 = \Delta S_{\alpha} + \Delta S_{\beta} = 0.5\sqrt{(\gamma n)^2 + [m + (1-\gamma)n]^2 \tan^2 \varphi} + 0.5\sqrt{(\gamma n)^2 + [m + (\gamma-1)n]^2 \tan^2 \varphi} \quad (15)$$

RPC 在补偿过程中所需的基波总能量是 m, n, φ, γ 的函数,其中在 m, n 一定的情况下,可以求 φ, γ 的最优解使 S'_1 在最小能量下补偿。

图 4 中优化补偿情况下,设 I'_{α}, I'_{β} 为补偿后二次侧目标电流基波,分别和 I'_A, I'_B 同相位。将补偿后二次侧基波电流 $I'_{\alpha} = I'_{\alpha} e^{j(-30^\circ + \varphi)}, I'_{\beta} = I'_{\beta} e^{j(-90^\circ - \varphi)}$ 代入式(6),其中 I'_{α}, I'_{β} 分别为 I'_{α}, I'_{β} 的有效值,经过计算可以得出 I^- 为:

$$I^- = \frac{\sqrt{3}}{3k} \sqrt{I_{\alpha}^{\prime 2} + I_{\beta}^{\prime 2} - 2I'_{\alpha} I'_{\beta} \cos(60^\circ - 2\varphi)} \quad (16)$$

其中, I^- 为负序电流 I^- 的有效值。

利用式(8)得到的 I_2^* ,可得约束条件:

$$I^- \leq I_2^* \quad (17)$$

以式(15)为目标函数,则可以通过 PSO 算法^[16] 求满足负序要求的 RPC 能量优化问题:

$$\begin{cases} \min_{\varphi} S \\ \text{s.t.} & 0 \leq \gamma \leq 1 \\ & 0 \leq \varphi \leq \pi/6 \\ & I^- \leq I_2^* \end{cases} \quad (18)$$

由式(18)求得满足 S 最小时的最优解 φ, γ 。

2.2 谐波补偿的能量优化

谐波完全补偿时所需谐波能量 S_2 为:

$$S_2 = U_{\alpha} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{\alpha h}^2} + U_{\beta} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{\beta h}^2} \quad (19)$$

其中, U_{α}, U_{β} 分别为 α, β 两供电臂电压有效值, $I_{\alpha h}, I_{\beta h}$ 分别为 α, β 两供电臂第 h 次谐波电流有效值。

根据 GB/T14549—93《电能质量 公共电网谐波》,可以将比较严重的 3、5、7 次谐波电流补偿到满足国标要求的谐波电流允许值 I_3^*, I_5^*, I_7^* ,其他次谐波电流完全补偿,并可使总谐波畸变率 THD_i 低于给定值 THD_i^* 。定义谐波补偿度为 ψ ,优化补偿后的谐波电流为 $I'_{\alpha h}, I'_{\beta h}$,补偿前谐波电流为 $I_{\alpha h}, I_{\beta h}$,则 ψ_{jh} ($j = \alpha$ 或 $\beta; h = 3, 5, 7$) 为:

$$\begin{cases} \psi_{\alpha h} = I'_{\alpha h} / I_{\alpha h} \\ \psi_{\beta h} = I'_{\beta h} / I_{\beta h} \end{cases} \quad (20)$$

若 $\text{THD}_i \leq \text{THD}_i^*$, ψ_{jh} 可由下式计算得到:

$$\psi_{jh} = \begin{cases} 1 & I_{jh} \leq I_h^* \\ I_h^* / I_{jh} & I_{jh} > I_h^* \end{cases} \quad (21)$$

若 $\text{THD}_i > \text{THD}_i^*$,则 ψ_{jh} 可由下式计算得到:

$$\psi_{jh} = \begin{cases} \text{THD}_i^* / \text{THD}_i & I_{jh} \leq I_h^* \\ (I_h^* \times \text{THD}_i^*) / (\text{THD}_i \times I_{jh}) & I_{jh} > I_h^* \end{cases} \quad (22)$$

ψ_{jh} 可以根据实时检测到的 I_{jh} 由式(21)、(22)直接算得。

谐波优化补偿时所需谐波能量 S'_2 为:

$$S'_2 = S_2 - U_{\alpha} \sqrt{\sum_{h=3,5,7} (I'_{\alpha h})^2} - U_{\beta} \sqrt{\sum_{h=3,5,7} (I'_{\beta h})^2} \quad (23)$$

经过负序补偿和谐波补偿的能量优化后,RPC 补偿所需总能量 S 为基波能量 S_1' 和谐波能量 S_2' 之和:

$$S = S_1' + S_2' \quad (24)$$

3 应用分析

3.1 实时补偿解决措施

以某个实际牵引变为例, α 、 β 两供电臂实际负荷功率 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 变化范围分别为 0~20 MW, 以 1 MW 为变化步长, 对 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 各种负荷组合情况利用 2.1 节所述方法进行 PSO 离线计算, 求出满足不同负荷情况下的最优解 φ 、 γ , 制定出补偿度和负荷情况对照表。表中数据满足下式:

$$\begin{cases} \varphi_{jk} = f(P_{\alpha 0j}, P_{\beta 0k}) \\ \gamma_{jk} = g(P_{\alpha 0j}, P_{\beta 0k}) \end{cases} \quad (25)$$

$$P_{\alpha 0j} = j \quad j = 0, 1, 2, \dots, 20$$

$$P_{\beta 0k} = k \quad k = 0, 1, 2, \dots, 20 \quad (26)$$

以有功补偿度 γ 为例, α 供电臂实际负荷功率为 $P_{\alpha 0j}$ 时, γ 以 β 供电臂负荷功率 $P_{\beta 0}$ 为变量拟合得到的多项式为:

$$\gamma_{P_{\alpha 0j}} = \sum_{i=0}^l a_{ij} P_{\beta 0}^i \quad j = 0, 1, 2, \dots, 20 \quad (27)$$

根据 a_{ij} 随 $P_{\alpha 0j}$ 的变化情况, 可以拟合得到 a_i 以 $P_{\alpha 0}$ 为变量的多项式为:

$$a_i = \sum_{t=0}^h b_{it} P_{\alpha 0}^t \quad (28)$$

这样就可以拟合得到 γ 以连续量 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 为变量的多项式为:

$$\gamma = g(P_{\alpha 0}, P_{\beta 0}) = \sum_{i=0}^l \sum_{t=0}^h b_{it} P_{\alpha 0}^i P_{\beta 0}^t \quad (29)$$

同理可以得到 φ 以连续量 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 为变量的多项式:

$$\varphi = f(P_{\alpha 0}, P_{\beta 0}) = \sum_{i=0}^{l'} \sum_{t=0}^{h'} d_{it} P_{\alpha 0}^i P_{\beta 0}^t \quad (30)$$

对于算得的 φ_{jk} 、 γ_{jk} 为零的情况, 不计入多项式拟合的计算中。 l 、 l' 、 h 、 h' 的值根据实际情况和要求的拟合度确定, 本算例中参数的拟合度在 99% 以上。

将式(9)代入式(29)、(30)可以近似得到 φ 、 γ 用 m 、 n 表示的多项式:

$$\begin{cases} \varphi = f(m, n) \\ \gamma = g(m, n) \end{cases} \quad (31)$$

其中, $m \in [0, 40]$, $n \in [0, 20]$ 。

3.2 RPC 容量配置

利用能量优化补偿策略, 将 RPC 的容量配置为 S^* :

$$S^* = S_{1\max}' + S_{2\max}' \quad (32)$$

$S_{1\max}'$ 、 $S_{2\max}'$ 可根据实际负荷变化情况, 利用能量优化方法, 事先离线计算得到。根据谐波的实测数据, 谐波含量较低, 基本符合国标要求, 能量优化补

偿下谐波容量 $S_{2\max}'$ 相对于完全补偿下谐波容量 $S_{2\max}$ 有一定降低, 但主要是负序问题决定着 RPC 补偿装置的容量。

以 3.1 节中实际牵引变为例, 当 α 、 β 两供电臂实际负荷功率 $P_{\alpha 0}$ 、 $P_{\beta 0}$ 变化范围分别为 0~20 MW 时, 能量优化补偿所需 S_1' 的最大值 $S_{1\max}'$ 出现在一供电臂负荷为 0 MW、另一供电臂负荷为 20 MW 处, 此时 φ 、 γ 分别为 13.03°、0.592 3, $S_{1\max}'$ 为 12.84 MV·A。

由式(4)、(5)可得完全补偿时所需基波能量 S_1 为:

$$S_1 = \sqrt{n^2 + m^2 \tan^2 30^\circ} \quad (33)$$

对于不同的负荷情况, S_1 的最大值 $S_{1\max}$ 出现在两供电臂负荷均为 20 MW 或一供电臂负荷为 0 MW、另一供电臂负荷为 20 MW 处, 此时 $S_{1\max}$ 为 23.10 MV·A, 能量优化补偿方法下负序容量 $S_{1\max}'$ 仅为完全补偿下负序容量 $S_{1\max}$ 的 55.58%, 提高了补偿装置的经济性。

3.3 对实际负荷功率因数不为 1 的修正

考虑功率因数不为 1 的情况下, 牵引变电所 α 、 β 两供电臂负荷可能出现以下 4 种情况: 两臂均为牵引工况; 两臂均为再生制动工况; α 供电臂为牵引工况, β 供电臂为再生制动工况; α 供电臂为再生制动工况, β 供电臂为牵引工况。补偿前 A、B、C 三相电流 I_{A0} 、 I_{B0} 、 I_{C0} 不平衡, 存在负序电流。以图 5(a) 中两臂负荷均为牵引工况为例, I_{A0} 滞后 U_A 角度 $30^\circ + \theta_\alpha$, I_{B0} 超前 U_B 角度 $30^\circ - \theta_\beta$, θ_α 、 θ_β 分别为 α 、 β 供电臂的功率因数角。其他负荷情况见图 5(b)、(c)、(d)。

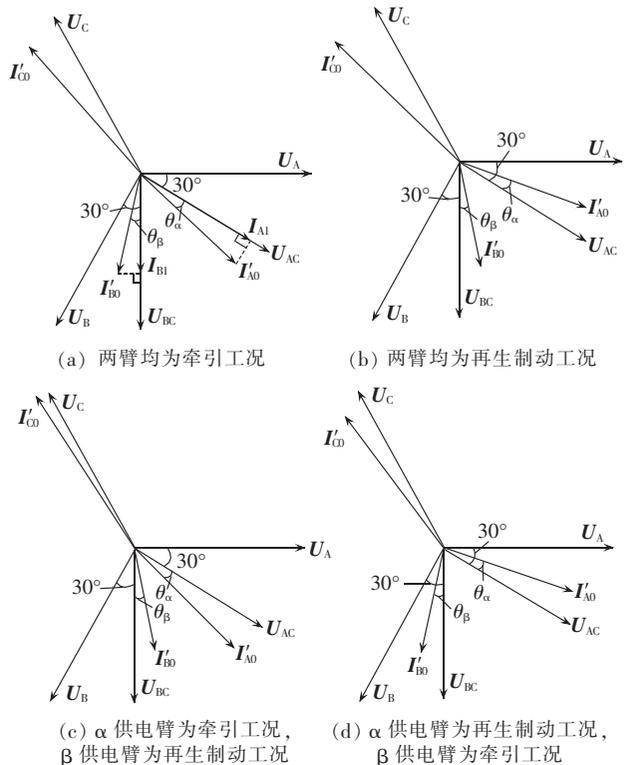


图 5 牵引负荷情况分类

Fig.5 Classification of traction loads

以图 5(a)中两臂负荷均为牵引工况为例,由实际负荷电流 I_{A0} 、 I_{B0} 的基波电流 I_{A1} 、 I_{B1} 按 2.1、3.1 节中方法进行分析, φ 、 γ 由式(31)直接计算得到。

定义 α 、 β 两供电臂基波负荷的无功补偿角度分别为 φ_α 、 φ_β 。定义 θ_α 、 θ_β 值的正负如下: θ_α 超前 U_{AC} 取正号, 滞后 U_{AC} 取负号; θ_β 超前 U_{BC} 取负号, 滞后 U_{BC} 取正号。

对负荷功率因数不为 1 进行补偿度修正, φ_α 可由式(34)得到:

$$\varphi_\alpha = \begin{cases} \varphi & \theta_\alpha \leq \varphi \\ \theta_\alpha & \theta_\alpha > \varphi \end{cases} \quad (34)$$

φ_β 可由式(35)得到:

$$\varphi_\beta = \begin{cases} \varphi & \theta_\beta \leq \varphi \\ \theta_\beta & \theta_\beta > \varphi \end{cases} \quad (35)$$

此时补偿的最优程度虽然不及 PSO 算出来的精确,但是既达到了国标的要求,又满足了补偿的实时性要求,有利于工程的实际应用。

4 谐波、负序电流的检测和控制方法

采用的 RPC 装置谐波和负序检测原理图见图 6。

经过 RPC 装置补偿后的 α 、 β 供电臂的基波目标电流 i'_{α} 、 i'_{β} 为:

$$\begin{cases} i'_{\alpha} = \sqrt{2} I'_{\alpha} \cos(\omega t - 30^\circ + \varphi_{\alpha}) \\ i'_{\beta} = \sqrt{2} I'_{\beta} \cos(\omega t - 90^\circ - \varphi_{\beta}) \end{cases} \quad (36)$$

将 α 、 β 两供电臂负荷电流检测值 $i_{\alpha L}$ 、 $i_{\beta L}$ 与 i'_{α} 、 i'_{β} 相减,此时补偿量中包含全部谐波,再减去满足国标要求的谐波电流 $i'_{\alpha h}$ 、 $i'_{\beta h}$ ($h=3,5,7$),即可得到需要补偿的谐波和负序电流为:

$$\begin{cases} i_{\alpha c} = i_{\alpha L} - i'_{\alpha} - i'_{\alpha 3} - i'_{\alpha 5} - i'_{\alpha 7} \\ i_{\beta c} = i_{\beta L} - i'_{\beta} - i'_{\beta 3} - i'_{\beta 5} - i'_{\beta 7} \end{cases} \quad (37)$$

将得到的 α 、 β 两供电臂补偿电流目标值 $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 通过滞环比较控制环节,即可控制变流器进行谐波、负序的综合补偿。

5 仿真分析和验证

以京津高速铁路某实际牵引变为例,3.2 节中已经验证了能量优化补偿策略下的 RPC 装置容量比完全补偿下的容量减小很多,对于实际负荷需要补

偿的能量小于额定容量 S^* 的情况,能够根据式(21)、(22)、(31)实时地计算各补偿度,采用 MATLAB/Simulink 仿真验证能量优化补偿策略的优越性。系统的仿真参数如下:三相电压为 220 kV;牵引变压器变比为 220:27.5;牵引变压器短路阻抗 U_k 为 8.6%;次边绕组负载损耗为 225 kW;RPC 降压变压器变比为 25:1.25;RPC 输出电感为 0.1 mH;RPC 直流电压为 4 kV;直流侧电容为 0.2 F;PI 参数为 $K_p=30$, $K_i=10$;滞环比较器滞环宽度为 0.2 H/A。

假设系统电压三相平衡情况下,某工况下 α 供电臂有功功率为 19.71 MW, β 供电臂有功功率为 4.47 MW。负载采用电阻负载并联不可控整流负载,功率因数近似为 1 且含有谐波^[14],满足高速铁路负荷的特性。设计满足以上功率负荷, α 供电臂负载为 0.20 Ω 电阻负载并联不可控整流负载,不可控整流负载为 0.23 Ω 电阻串联 0.07 H 电感, β 供电臂电阻负载为 0.75 Ω ,不可控整流负载 1.15 Ω 电阻串联 0.35 H 电感,两供电臂负载功率不相等。负载通过变比为 27.5:1.5 的变压器接入牵引网。图 7(a)为补偿前三相电流波形,可以看出三相电流不对称,且含有谐波。

考虑能量优化补偿的情况下,设系统短路容量为 1000 MV·A, ε_{L2} 考虑补偿裕度设为 1%,可以根据实际情况灵活调整。将式(37)中补偿电流 $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 加上谐波电流 $i'_{\alpha h}$ 、 $i'_{\beta h}$ ($h=3,5,7$),则对负序进行优化补偿,对谐波完全补偿。由式(8)可得优化补偿时负序电流有效值限值 $I_2^* = 26.24$ A。采用式(31)求得对应的无功补偿角度 φ 为 13.34°,有功补偿度 γ 为 0.5326。图 7(c)为只优化负序时补偿后三相电流波形。对负序和谐波均进行优化补偿时,3、5、7 次谐波电流限值按照国标折算到 1000 MV·A 短路容量取 4.8 A、4.8 A、3.4 A,谐波畸变率 THD_i^* 限值取 3%。补偿后三相电流波形如图 7(d)所示。

补偿前、完全补偿后和优化补偿后各项指标的仿真结果见表 1。

由图 7 和表 1 可以看出,完全补偿和优化补偿后谐波都明显减少,有良好的治理效果。负序优化补偿后的谐波电流 THD_i 比完全补偿后谐波电流 THD_i 要

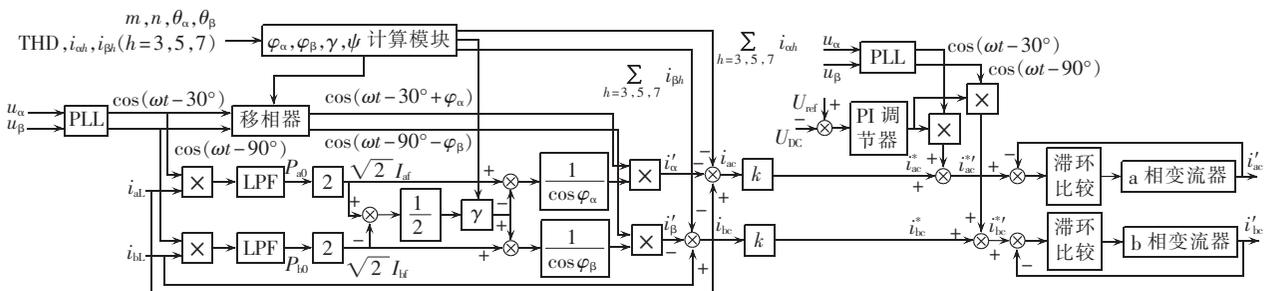


图 6 优化补偿下谐波和负序电流检测和控制框图

Fig.6 Detection and control of harmonic current and negative sequence current under optimal compensation

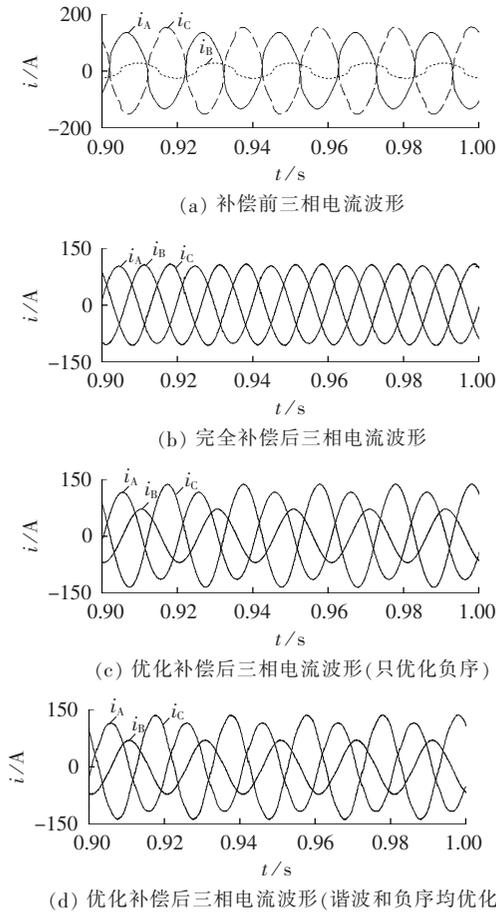


图 7 补偿前、完全补偿后和优化补偿后三相电流波形

Fig.7 Waveforms of three-phase currents before compensation, after complete compensation and after optimal compensation

表 1 仿真结果
Tab.1 Simulation results

指标	相别	补偿前	完全补偿	负序优化补偿	谐波和负序综合优化补偿
谐波电流 THD/%	A	13.60	1.99	0.99	2.95
	B	15.14	1.46	0.90	2.82
	C	10.99	2.78	1.15	2.54
3 次谐波电流有效值/A	A	10.67	1.30	0.70	1.33
	B	2.26	0.98	0.27	1.14
	C	8.66	1.93	0.89	0.90
5 次谐波电流有效值/A	A	6.11	0.20	0.16	1.53
	B	1.34	0.07	0.04	0.39
	C	6.04	0.25	0.19	1.58
7 次谐波电流有效值/A	A	4.07	0.24	0.14	1.11
	B	0.95	0.09	0.04	0.30
	C	2.73	0.19	0.17	1.35
负序电流有效值/A	—	43.83	1.56	26.59	26.36
三相电压不平衡度/%	—	1.67	0.06	1.01	1.00
RPC 所需能量 (负序+谐波)/(MV·A)	—	—	20.67+3.49	10.11+3.84	10.11+3.1

低,这是因为在直流侧电容一定的情况下,负序优化补偿时补偿的目标电流比完全补偿时小,所以补偿

的效果比完全补偿要好;而谐波和负序综合优化补偿后谐波电流 THD_i 小于且接近 3%,与给定的谐波畸变率 THD_i^* 限值相符,相对于完全补偿,一定程度上降低了补偿装置所需的谐波能量。

RPC 补偿前谐波电流较高,负序电流较大,负序电压不平衡度为 1.67%,超过国标规定。完全补偿后,负序电流可以基本全部消除,三相电流接近平衡,负序电压不平衡度近似为零,但 RPC 所需补偿负序能量较高,为 20.67 MV·A。优化补偿后,负序电流可以按需补偿到该系统的负序电流限值,负序电压不平衡度也与给定值 ε_{U2} 相符,满足国标要求,且 RPC 所需补偿负序能量大幅减小,减小了 10.56 MV·A,优化补偿所需负序能量为完全补偿的 48.91%。

本文所提的能量优化补偿策略能够有效减小 RPC 装置所需补偿能量,本算例中负序优化补偿使 RPC 补偿装置的能量从 24.16 MV·A 减至 13.95 MV·A,谐波和负序均优化补偿后,装置所需能量进一步减小为 13.21 MV·A。RPC 补偿能量的减小,一方面靠使谐波和负序电流只补偿到满足国标要求;另一方面对于特定的谐波和负序电流限值,计算出 RPC 所需总能量 S 较小情况下的有功补偿度 γ 、无功补偿角度 φ 和谐波补偿度 ψ 。由此给出的补偿目标电流量控制方便,易于实现。

6 结论

本文提出的 RPC 容量配置和能量优化补偿策略,能够减小装置的设计容量,且能使装置在较小能量下补偿谐波和负序电流,既能使谐波和负序电压不平衡度满足国标要求,又能提高装置的经济性。

对 RPC 进行最优稳态功率分析,在满足特定谐波和负序电流限值的情况下,提出的检测方法能够直接计算出补偿总能量 S 较小时无功、有功补偿指标 φ 、 γ 和谐波补偿度 ψ 。通过对 φ 、 γ 、 ψ 的控制直接给出补偿后的目标电流量,实现 RPC 的最优能量控制,控制方法简单,易于实现。

通过大量事先离线计算不同负荷情况下的最优解 φ 、 γ ,制定出补偿度和负荷情况对照表。利用补偿度和负荷情况对照表中的数据,采用参数拟合的方法计算出 φ 、 γ 的表达式,并对功率因数不为 1 的情况进行修正,可以由实测负荷迅速算出补偿度,满足实时补偿要求,有利于工程的实际应用。

仿真结果验证了本文提出的能量优化补偿策略在有效治理谐波和负序电流的基础上,大幅提高了 RPC 补偿装置的经济性。

参考文献:

[1] 卢志海,厉吉文,周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器,2004,32(11):33-36.

- LU Zhihai, LI Jiwen, ZHOU Jian. The impact of electrified railway on electric power system[J]. Relay, 2004, 32(11):33-36.
- [2] MA Jianzong, WU Mingli, YANG Shaobing. The application of SVC for the power quality control of electric railways[C]//International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN'09. Nanjing, China: IEEE Computer Society, 2009: 1-4.
- [3] 刘剑, 黄小庆, 曹一家, 等. 三相 SVC 在电气化铁路电能质量治理中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6):22-28.
LIU Jian, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Application of three-phase SVC in power quality management for electrified railway[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6):22-28.
- [4] 赵伟, 涂春鸣, 罗安, 等. 适用于电气化铁路的单相注入式混合有源滤波器[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21):51-56.
ZHAO Wei, TU Chunming, LUO An, et al. A novel single-phase hybrid active power filter applied to electrical railway system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21):51-56.
- [5] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K. A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway[C]//Power Electronics Specialists Conference. Aachen, German: IEEE, 2004: 1869-1873.
- [6] MORIMOTO H, ANDO M, MOCHINA Y, et al. Development of railway static power conditioner used at substation for Shinkansen [C]//Power Conversion Conference. Osaka, Japan: [s.n.], 2005: 1108-1111.
- [7] 王果, 田铭兴, 任恩恩. 降低电气化铁路混合有源补偿装置有源支路容量的分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(9):18-23.
WANG Guo, TIAN Mingxing, REN Enen. Reduced active part rating of hybrid active compensation for electrification railway [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9):18-23.
- [8] 邱大强, 李群湛, 余俊祥, 等. 混合式电铁电能质量调节器补偿原理及容量分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10):59-64.
QIU Daqiang, LI Qunzhan, YU Junxiang, et al. Compensation principle of hybrid power quality conditioner for electric railroads and capacity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10):59-64.
- [9] 朱红萍, 罗隆福. 新型电气化铁道电能质量综合治理装置[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7):72-76.
ZHU Hongping, LUO Longfu. Power quality improving device for electric railroads [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(7):72-76.
- [10] OHMI M, YOSHII Y. Validation of railway static power conditioner in Tohoku Shinkansen on actual operation[C]//Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, Japan: IEEE, 2010:2160-2164.
- [11] ZHANG Yin, LUO An, WU Chuanping, et al. The electrical model and parameter design of hybrid Railway Unified Power Quality Controller (RUPQC)[C]//2010 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Nanjing, China: IEEE, 2010: 1-8.
- [12] 邱大强, 李群湛, 周福林, 等. 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电能质量综合治理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6):36-39, 44.
QIU Daqiang, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Comprehensive power quality control of electric railway based on back-to-back SVG [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 36-39, 44.
- [13] WEI Yingdong, JIANG Qirong, ZHANG Xiujuan. An optimal control strategy for power capacity based on railway power static conditioner[C]//Asia Pacific Conference on Circuits and Systems. Macao, China: IEEE, 2008: 236-239.
- [14] 吴传平, 罗安, 徐先勇, 等. 采用 V/V 变压器的高速铁路牵引供电系统负序和谐波综合补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16):111-117.
WU Chuanping, LUO An, XU Xianyong, et al. Integrative compensation method of negative phase sequence and harmonic for high-speed railway traction supply system with V/V transformer [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16):111-117.
- [15] LUO An, WU Chuanping, SHEN J, et al. Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10):2844-2856.
- [16] 曾建潮, 介婧, 崔志华. 微粒群算法[M]. 北京: 科学出版社, 2004:9-13.

作者简介:



张鑫

张鑫(1988-),女,辽宁盘锦人,硕士研究生,主要研究方向为电气化铁路电能质量治理(E-mail:06dqgcxz02@zju.edu.cn);

江全元(1975-),男,湖北黄冈人,教授,博士研究生导师,通讯作者,主要研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统高性能计算、可再生能源发电与储能应用(E-mail:jqy@zju.edu.cn)。

Capacity configuration of V/V transformer-based railway power conditioner and optimal energy compensation strategy

ZHANG Xin, JIANG Quanyuan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the harmonic current and negative sequence current of high-speed railway traction power supply system, an optimal energy compensation strategy based on RPC (Railway static Power Conditioner) is proposed and the detection method of harmonic and negative sequence currents in optimal compensation condition is discussed. The optimal steady-state power of RPC is analyzed according to its compensating energy and three performance indexes are proposed: active power compensating degree (γ), reactive power compensating angle (φ) and harmonic current compensating degree (ψ). PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm is used to calculate these three indexes for the minimum compensating energy. The optimal energy compensation is realized by controlling three indexes. The capacity of RPC is configured by the optimal energy compensation strategy. An application to real time compensation is proposed. Simulative results show that the RPC capacity is reduced due to the optimal energy compensation strategy.

Key words: railway power conditioner; negative sequence current; harmonic current; energy optimization; capacity configuration; V/V transformer; compensation