

组合式同相供电系统容量配置优化及分析

常文寰, 王果

(兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为优化组合式同相供电系统同相补偿装置的容量, 在牵引变电所端口电气量分析的基础上, 利用变压器平衡接线和对称分量法原理, 对同相补偿装置和牵引变压器的相对容量(β_1)、电网侧负序和无功功率关系进行了分析。通过分析组合式同相供电系统结构, 得到牵引变压器容量、同相补偿装置容量、系统短路容量和负载容量之间的关系, 进而求得组合式同相供电系统在完全补偿、满意补偿条件下的 β_1 值。分析表明, 完全补偿时, β_1 等于 1。无功满意补偿时, 高速铁路不设无功补偿, 功率因数可满足国标; 普速铁路根据负载功率因数设置无功补偿度。负序不平衡度满足国标时, 根据短路容量和负载容量设计 β_1 。最后利用 Matlab 软件仿真验证了该结果的正确性。
关键词: 组合式同相供电; 补偿容量; 负序补偿; 功率因数; 无功补偿

Optimizing and analyzing of capacity configuration in combined co-phase power supply system

CHANG Wenhuan, WANG Guo

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to optimize the capacity of co-phase compensation device in combined co-phase power supply system, the relationship among relative capacity (β_1) on co-phase compensation device and traction transformer, negative sequence and power factor is analyzed. Based on structure analysis of combined co-phase power supply system, with the usage of principle of transformer connection, the compensation principle of traction substation and symmetrical components theory, the relationship among traction transformer capacity, co-phase compensation device capacity, system short circuit capacity and load capacity is obtained. And then a series of values of β_1 on complete compensation and satisfying compensation are analyzed respectively. The search result indicates as follows. The value of β_1 is 1 when completely compensated. High speed railway doesn't need reactive compensation when satisfying compensation on reactive power because its power factor is nearly 1, but ordinary speed railway set reactive power compensation factor according to power factor of load. Both of them need determine the values of β_1 according to the short circuit and load capacity. Eventually simulation results by Matlab verify the validity of analytical calculation.

This work is supported by Gansu Province Science and Technology Plan (No. 1504WKCA016), Tutors of Project in Gansu Province (No. 2015A-055), and National Natural Science Foundation of China (No. 51367010).

Key words: co-phase power supply system; compensation device capacity; negative sequence compensation; power factor; reactive compensation

0 引言

电气化铁路牵引负荷是单相、非线性、冲击性负荷, 直接接入电力系统会引起负序、无功、谐波等电能质量问题^[1-2]。随着京津城际高铁的开通, 我国电气化铁路正式进入高速时代, 牵引负荷产生的

负序电流成为影响电力系统电能质量的主要因素。换接相序以及有源、无源补偿装置虽能有效抑制负序, 补偿无功、谐波^[3], 但是过分相引起的牵引力损失甚至安全隐患并不能有效缓解^[4-6]。文献[7]提出组合式同相供电系统, 牵引变压器与补偿装置互相独立, 补偿装置不占用牵引变压器容量, 二者共同为牵引负荷供电, 彻底取消电分相环节, 有效补偿负序等电能质量问题, 实现全线贯通供电。

同相供电技术的关键是补偿装置容量的设计^[8-9]。

基金项目: 甘肃省科技计划资助(1504WKCA016); 甘肃省硕士项目(2015A-055); 国家自然科学基金项目资助(51367010)

为了适应牵引负荷供电要求, 需要在满足国标的前提下, 降低补偿装置容量, 提高同相供电系统的经济性。本文针对组合式同相供电系统分别推导牵引变电所完全补偿以及满意补偿时的容量优化配置, 并对其技术经济性进行分析比较。

1 组合式同相供电系统结构

组合式同相供电系统是指牵引变压器与补偿装置互相独立, 共同为牵引负荷供电的同相供电系统。电气化铁路全线电压同相位, 取消分相绝缘器, 实现贯通供电^[6-7]。

组合式同相供电系统的牵引变电所由单相牵引变压器(TT)和补偿装置(CPD)构成, 其中高压匹配变压器(HMT)、单相背靠背变流器、牵引匹配变压器(TMT)共同构成补偿装置, 组合式同相供电系统有如下两种结构^[7]。如图 1 所示为单相组合式同相供电系统, 高压匹配变压器为单相变压器; 如图 2 所示为单三相组合式同相供电系统, 高压匹配变压器为 YN, d11 接线。

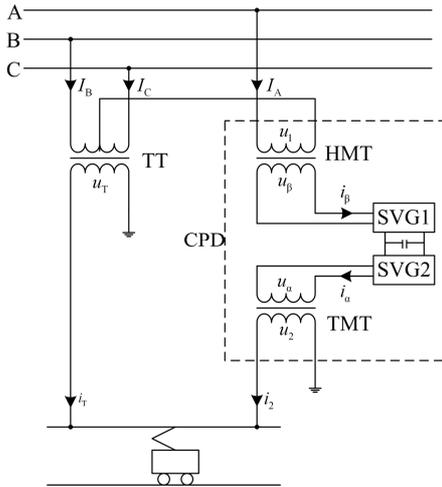


图 1 单相组合式同相供电系统结构图

Fig. 1 Connection diagram of combined co-phase supply system with a single-phase modular

由于在牵引臂负载阻抗角相等的情况下, 在电力系统侧产生负序电流最大的是单相变压器; 其次是 Yd11 接线变压器和 V 接线变压器; 最小的是平衡接线变压器^[10], 因此为将系统本身负序降到最低, 在单相组合式同相供电系统中, 牵引变压器与高压匹配变压器构成平衡接线形式; 单三相系统中, 两牵引变压器次边绕组电压相位相差 90° 。与原牵引供电系统相比, 牵引侧供电臂电压相位全线相同, 可取消变电所出口电分相, 减少了机车过分相的牵引力损失, 适宜高速铁路运行; 牵引变压器和补偿装置互相独立, 共同为牵引负荷供电, 不但可以补

偿系统负序、无功以及谐波, 而且可以减少牵引变压器的容量。

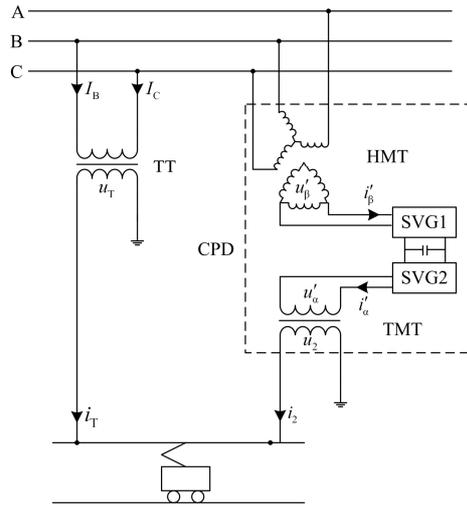


图 2 单三相组合式同相供电系统结构图

Fig. 2 Connection diagram of combined co-phase supply system with a single-phase and three-phase modular

2 综合补偿原理

图 1 所示的单相组合式同相供电系统中, 牵引变压器和高压匹配变压器均为单相联结, 两端口二次侧电压构成平衡接线形式。

假设电网线电压 $u_{BC} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}U_A \sin \omega t$, 则牵引变压器及高压匹配变压器二次侧电压分别为

$$\begin{cases} u_T = \sqrt{2}U_T \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}K_T U_A \sin \omega t \\ u_\beta = \sqrt{2}U_\beta \sin(\omega t + 90^\circ) = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}K_\beta U_A \sin(\omega t + 90^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

式中: K_T 和 K_β 分别是变压器两端口的变比^[11], 且

$$有 K_T = \frac{U_T}{\sqrt{3}U_A}; K_\beta = \frac{U_\beta}{\sqrt{3}U_A}。$$

图 2 所示的单三相组合式同相供电系统中, 高压匹配变压器为 YN, d11 接线形式, 电压 u'_β 相位选择三角形接线 AC 相, 与牵引变压器二次侧电压 u_T 相位差 90° , 构成平衡接线。两种结构牵引变压器二次侧电压相同, 后者高压匹配变压器二次侧电压为

$$\begin{aligned} u'_\beta &= \sqrt{2}U'_\beta \sin(\omega t + 90^\circ) = \\ &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{3}K'_\beta U_A \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

两种同相供电系统在容量配置方面区别仅在于高压匹配变压器的容量利用率, 牵引变压器以及补偿装置的补偿原理及容量配置均一致。

设 PCC 处的正序阻抗与负序阻抗相等, 那么负

序电压不平衡度近似为^[12]

$$\varepsilon_U = \frac{\sqrt{3}IU_N}{S_d} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U_N 为线电压; S_d 为 PCC 处的三相短路容量。

牵引变压器和高压匹配变压器两个端口共同作用在原边的负序电流分量一般表达式^[11]为

$$\dot{i}^- = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[K_T \dot{i}_T e^{-j(2\psi_T + \varphi_T)} + K_\beta \dot{i}_\beta e^{-j(2\psi_\beta + \varphi_\beta)} \right] \quad (4)$$

式中: ψ_T 和 ψ_β 分别是变压器两端口电压滞后 U_A 的相角; φ_T 和 φ_β 分别是变压器两端口功率因数角。

由于组合式同相供电结构的平衡接线形式, 将接线角 $\psi_T = -90^\circ$ 、 $\psi_\beta = 180^\circ$ 代入式(3)、式(4)得

$$\frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{U_T}{\sqrt{3}U_A} I_T e^{-j(180+\varphi_T)} + \frac{U_\beta}{\sqrt{3}U_A} I_\beta e^{-j(360+\varphi_\beta)} \right| = \frac{S^-}{\sqrt{3}U_N} \quad (5)$$

式中, S^- 为系统负序功率。

假设牵引变压器及高压匹配变压器均为理想变压器, 功率因数角 $\varphi_T = \varphi_\beta$, 则

$$S_T - S_1 = S^- \quad (6)$$

式中: S_1 为 SVG1 容量; S_T 为牵引变压器容量。

牵引负载电流为

$$\begin{aligned} i_L &= \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + i_h = \\ &\sqrt{2}I_p \sin \omega t + \sqrt{2}I_q \cos \omega t + i_h \end{aligned} \quad (7)$$

式中: i_h 为牵引负载谐波电流分量; I_1 为负载电流基波分量; φ_1 为基波电流相角, 且 $I_p = I_1 \cos \varphi_1$,

$$I_q = I_1 \sin \varphi_1。$$

根据结构图可以看出, 牵引变压器与同相补偿装置共同向负载提供有功功率, 两单相背靠背 SVG 共同平衡系统负序, SVG2 补偿系统无功、谐波^[13-14]。因此有

$$\begin{cases} P_L = P_T + P_1 \\ S_2 = \sqrt{P_1^2 + Q_L'^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_L 为负载有功功率; P_T 为牵引变压器有功功率, 其值大小等于 S_T ; P_1 为 SVG1 有功功率其值大小等于 S_1 ; Q_L' 为 SVG2 补偿负载的无功功率; S_2 为 SVG2 视在功率。

3 组合式同相供电容量配置优化

由于铁路负载类型决定高速铁路同相供电补偿的关键是抑制负序, 而重载和普速铁路需要抑制负序、提高网侧功率因数^[15-16]。因此在容量配置方面应考虑负序、无功的综合补偿, 在此基础上利用补偿装置滤除谐波。

设牵引变压器是理想变压器, 根据上文 SVG1 只承担一部分负载有功功率, 结合式(8), 令

$$\begin{cases} I_T = n_T I_p \\ I_{Cp} = (1 - n_T) I_p \end{cases} \quad (9)$$

式中: I_T 为牵引变压器二次侧输出有功电流值; I_{Cp} 为补偿装置输出有功电流值; n_T 为牵引变压器次边电流与牵引负载有功电流比值。

设牵引负载电流谐波总畸变率为 THD_L (下文简记做 $H\%$), 则

$$H\% = \frac{I_h}{I_1} \quad (10)$$

3.1 完全补偿容量配置

根据式(6)可知, 当同相供电系统负序完全补偿时, 牵引变压器容量与 SVG1 容量相等, $n_T = \frac{1}{2}$ 。

此时, 若无功谐波也完全补偿, SVG2 总容量为 SVG1 传递的有功以及负载的全部无功、谐波三者容量之和。结合式(8)、式(9), 系统完全补偿时牵引变压器、SVG1、SVG2 的容量分别为

$$\begin{cases} S_T = S_1 = \frac{1}{2} U_T I_p \\ S_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2} U_T I_p\right)^2 + (U_T I_q)^2 + \left(U_T \sum_{h=2}^{\infty} I_h\right)^2} \end{cases} \quad (11)$$

结合式(7)、式(9)和式(10)得

$$\begin{cases} \frac{S_T}{S_L} = \frac{S_1}{S_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + H\%^2}} \\ \frac{S_2}{S_L} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{\cos^2 \varphi_1}{1 + H\%^2} + \frac{1 - \cos^2 \varphi_1}{1 + H\%^2} + \frac{H\%^2}{1 + H\%^2}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{式中: } S_L = U_T I_L; \quad \frac{I_L}{I_1} = \sqrt{1 + H\%^2}。$$

根据式(12)做出三者容量比与负载功率因数、谐波电流畸变率关系如图 3 所示。

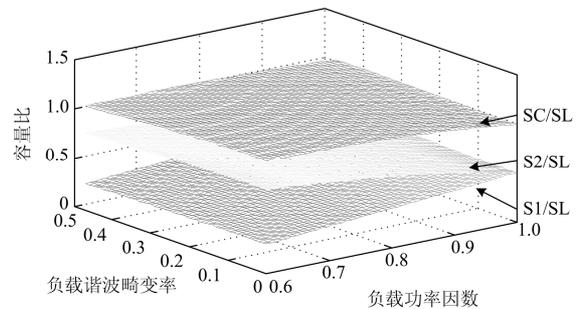


图 3 完全补偿时负载功率因数、谐波畸变率与容量比关系
Fig. 3 Relationship among power factor, THD of the load and the ratio of capacity when completely compensated

从图3可以看出, 功率因数对牵引变压器以及补偿装置容量的影响高于负载谐波畸变率对其影响。负载电流谐波畸变率越大, 功率因数越低, 补偿装置容量越大; 反之, 补偿装置容量越小。当负载谐波电流谐波畸变率为0, 功率因数为1时, 牵引变压器、SVG1、SVG2容量相等, 均为负载容量的一半, 此时补偿装置容量最小; 当负载谐波电流畸变率为45%, 功率因数为0.6时, 负载有功电流与负荷电流比值较小, 牵引变压器和SVG1容量小于SVG2容量, 此时补偿装置容量最大, 约为1.1 S_L 。

3.2 满意补偿容量配置

组合式同相供电系统补偿装置SVG1端口电压与牵引变压器端口电压相位差 90° , 其作用是为了补偿系统负序。当同相供电系统不补偿时, 补偿装置容量为0, 此时负序不补偿, $S^- = S_T$; 无功、谐波不补偿, 负载的全部无功、谐波通过牵引变压器流入电力系统。当同相供电系统不完全补偿时, 需引入负序、无功、谐波补偿度, 得

$$\begin{cases} S_1 = K_N \cdot S_L n_T \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1+H\%^2}} \\ S_2 = S_L \sqrt{n_T^2 \frac{\cos^2 \varphi}{1+H\%^2} + K_C^2 \frac{1-\cos^2 \varphi}{1+H\%^2} + K_h^2 \frac{H\%^2}{1+H\%^2}} \\ S_T = S_L n_T \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1+H\%^2}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: K_N 为负序补偿度, 补偿后系统负序容量为 $(1-K_N)S_T$; K_C 为无功补偿度, 补偿后流入电力系统无功功率为 $(1-K_C)U_T I_q$; K_h 为谐波补偿度。

(1) 无功补偿模式

根据对称分量法^[17-18]以及计算牵引变压器原、次边电流变换一般关系^[11]组合式同相供电系统电流变换矩阵可写为

$$\begin{pmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{pmatrix} = \frac{K_\beta}{2} \begin{pmatrix} 0 & -2 \\ -\frac{\sqrt{3}K_T}{K_\beta} & 1 \\ \frac{\sqrt{3}K_T}{K_\beta} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_T \\ I_\beta \end{pmatrix} \quad (14)$$

则牵引变压器和高压匹配变压器组成的斯科特连接组原边三相电流为

$$\begin{cases} I_A = -K_\beta I_\beta \\ I_B = \frac{K_\beta}{2} I_\beta - \frac{\sqrt{3}K_T}{2} I_T \\ I_C = \frac{K_\beta}{2} I_\beta + \frac{\sqrt{3}K_T}{2} I_T \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)做出负载功率因数为1时电网侧电流、电压相量图, 如图4所示。

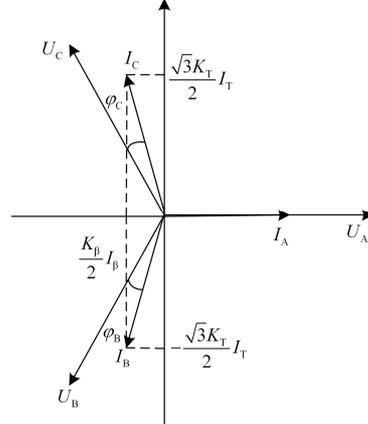


图4 电网侧三相电压、电流相量图

Fig. 4 Phasor diagram of three-phase voltage and current in grid-side

从图4可以看出, 牵引变压器电压 U_{BC} 和电流 I_{BC} 同相位, 但B、C相电流和B、C相电压存在相位差, 由此可得负载功率因数为1时组合式同相供电系统本身的无功功率为

$$\begin{aligned} Q_0 &= U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C = \\ &S_T \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\beta_1^2 + 3} \sin(30^\circ - \arctan \frac{\beta_1}{\sqrt{3}}) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: β_1 是 SVG1 与牵引变压器的容量比值, 即

$$\beta_1 = \frac{S_1}{S_T}。$$

电网侧三相功率为

$$S = \sqrt{3}U_A \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} = S_T \sqrt{\frac{3}{2}(1 + \beta_1^2)} \quad (17)$$

根据式(16)、式(17)得到负载功率因数为1时系统折算到电网侧功率因数为

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \sqrt{1 - \left(\frac{Q_0}{S}\right)^2} = \\ &\sqrt{1 - \frac{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\beta_1^2 + 3} \sin(30^\circ - \arctan \frac{\beta_1}{\sqrt{3}})\right)^2}{\frac{3}{2}(1 + \beta_1^2)}} \end{aligned} \quad (18)$$

根据式(18)得到负载功率因数为 1 时 β_1 与电网侧功率因数关系如图 5 所示。

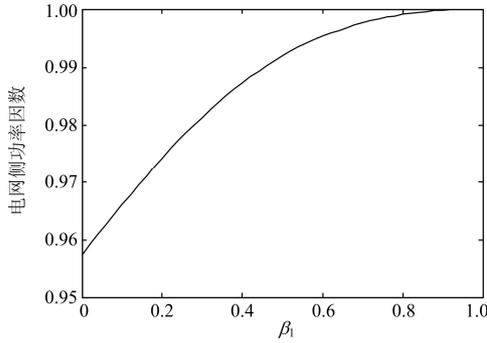


图 5 负载功率因数为 1 时 β_1 与电网侧功率因数关系

Fig. 5 Relationship between β_1 and power factor in grid-side when the power factor of load is 1

根据图 5 可以看出, 在负载功率因数为 1 的情况下, 当 SVG1 容量和牵引变压器容量相等时, 电网侧功率因数最大为 1; 当不设补偿装置即 SVG1 容量为 0 时, 电网侧功率因数最小为 0.958。

当负载为 S_L 且无功补偿度为 K_C 时, 负载中未补偿的无功功率部分会注入电力系统, 这部分无功功率为

$$Q_1 = (1 - K_C) \frac{S_L}{1 + H\%^2} \sin \varphi_L \quad (19)$$

根据式(16)一式(18)得到有负载通过且无功不完全补偿时, 折算到电网侧功率因数为

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{Q_0 + Q_1}{S} \right)^2} = \sqrt{1 - \frac{\left(\frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\beta_1^2 + 3} \sin(30^\circ - \arctan \frac{\beta_1}{\sqrt{3}}) + (1 - K_C) \frac{\beta_1 + 1}{1 + H\%^2} \sin \varphi_L \right)^2}{\frac{3}{2}(1 + \beta_1^2)}} \quad (20)$$

仅补偿无功, 谐波不补偿时, SVG2 与 SVG1 的容量比 β_2 为

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{\beta_1^2 + (K_C \frac{\beta_1 + 1}{1 + H\%^2} \sin \varphi_L)^2}}{\beta_1} \quad (21)$$

分别令 $\cos \varphi_L = 0.6$, $H\% = 47\%$ 模拟交直型负载、 $\cos \varphi_L = 0.95$, $H\% = 2.1\%$, 模拟交直型负载通过牵引变电所, 并结合式(20)可得两种负载情况下组合式同相供电系统 SVG1 与牵引变压器容量比、无功补偿度与电网侧功率因数关系如图 6、图 7

所示; 容量比 β_2 与 β_1 以及无功补偿度关系如图 8、图 9 所示。

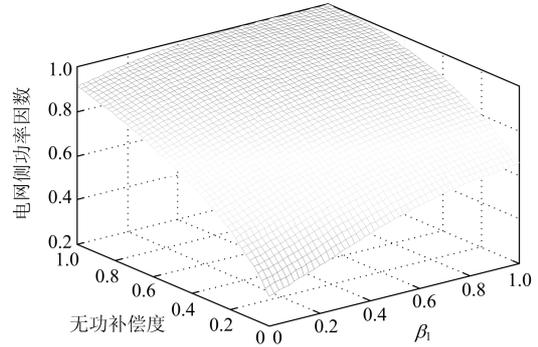


图 6 交直型负载通过时 β_1 、无功补偿度与电网侧功率因数关系

Fig. 6 Relationship among β_1 , reactive compensation degree and power factor in grid-side when there are AC-DC loads

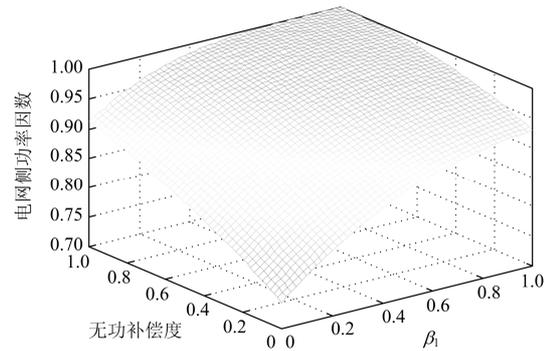


图 7 交直交负载通过时 β_1 、无功补偿度与电网侧功率因数关系

Fig. 7 Relationship among β_1 , reactive compensation degree and power factor in grid-side when there are AC-DC-AC loads

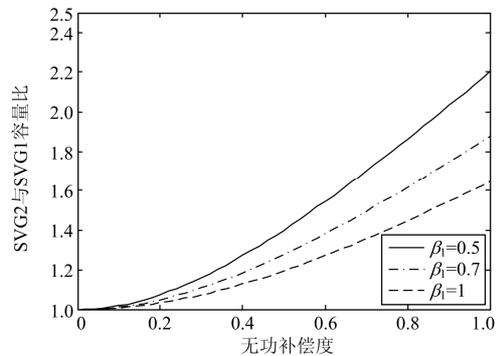


图 8 不同 β_1 情况下交直型负载通过时无功补偿度与 β_2 关系

Fig. 8 In different β_1 situations the relationship between β_2 and reactive compensation degree in grid-side when there are AC-DC loads

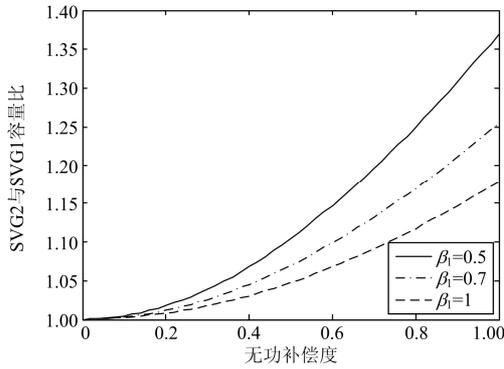


图9 不同 β_1 情况下交直交型负载通过时
无功补偿度与 β_2 关系

Fig. 9 In different β_1 situations the relationship between β_2 and reactive compensation degree in grid-side when there are AC-DC-AC loads

对比图 6、图 7 可知, 对于交直型负载, 当系统不设补偿装置时, 电网侧功率因数最低为约 0.57; 对于交直交型负载, 当系统不设补偿装置时, 电网侧功率因数最低约为 0.8。当补偿装置 SVG1 容量等于变压器容量且补偿度为 0 时, 两种负载情况电网侧功率因数分别达到 0.7 和 0.93, 说明通过交直交型负载网侧功率因数可以满足国标, 而交直型机车必须结合 SVG2 无功补偿网侧功率因数才可满足国标; 此时若无功补偿度为 1, 两种情况电网侧功率因数均达到最高值 1。

图 8、图 9 仿真结果表明, 交直交型负载通过时比交直型负载所需无功补偿装置容量小。当负载类型相同且无功补偿度相同时, SVG1 与牵引变压器容量比越大, SVG2 的容量越大。当 β_1 为 1 时, 通过交直型机车且功率因数为 1 时, SVG2 容量最大, 约为 $2.2S_T$ 。

(2) 负序补偿模式

由式(14)经过对称分量法计算可得电网侧负序、正序电流分别为

$$\begin{cases} I^- = \frac{1}{4K_\beta} (-\sqrt{3}\dot{I}_\beta + \sqrt{3}\frac{K_T}{K_\beta}\dot{I}_T e^{j90^\circ}) \\ I^+ = \frac{1}{4K_\beta} (-\sqrt{3}\dot{I}_\beta + \sqrt{3}\frac{K_T}{K_\beta}\dot{I}_T e^{j90^\circ}) \end{cases} \quad (22)$$

由此可知, 电网侧负序电流不平衡度为

$$\varepsilon = \frac{I^-}{I^+} = \left| \frac{\beta_1 - 1}{\beta_1 + 1} \right| \quad (23)$$

由式(23)可得容量比与电网侧负序电流不平衡度关系如图 10 所示。

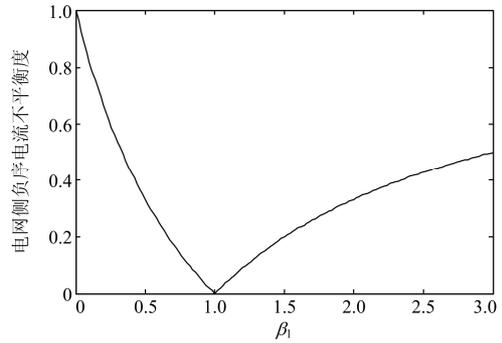


图 10 β_1 与电网侧负序电流不平衡度关系

Fig. 10 Relationship between β_1 and unbalanced degree of negative sequence in grid-side

从图 10 可以看出, 当 $0 < \beta_1 < 1$ 时, SVG1 可以平衡牵引变压器原边三相电流, 降低系统负序; 当 $\beta_1 = 1$ 时, 系统负序完全补偿; $\beta_1 > 1$ 时, 原边三相电流不平衡度增大, 增加系统负序。因此, 当 SVG1 与牵引变压器容量相等时, 系统负序最小为 0, 原边三相电流、电压平衡。组合式同相供电系统补偿装置由电力电子器件构成, 成本较牵引变压器更高, 故本文仅考虑 $0 < \beta_1 \leq 1$ 时负序补偿的满意优化。

设 110 kV 等级系统短路容量为 1 000 MVA, 负载容量为 30 MVA、50 MVA; 220 kV 等级系统短路容量为 3 000 MVA, 负载容量为 90 MVA、120 MVA。结合式(3)、式(8)得到同相供电系统各装置容量如表 1 所示。

通过表 1 的计算可知, 负序满意补偿较完全补偿时补偿装置容量显著降低。原边三相电压、电流负序满足国标的情况下, 电压等级越高, 所需要的相对补偿容量越小; 相同电压等级情况下, 负载容量越小, 所需要的补偿装置容量越小。

表 1 负序满意补偿时同相供电系统装置容量

Table 1 Capacity of combined co-phase power supply system when negative sequence is satisfactorily compensated

电压等级/kV	$S_d /$ MVA	$S_e /$ MVA	$S_L /$ MVA	$S_T /$ MVA	$S_1 /$ MVA	β_1
110	1 000	20	30	25	5	0.2
			50	35	15	0.43
220	3 500	70	90	80	10	0.125
			120	95	25	0.26

(3) 负序、无功综合补偿模式

根据表 1 的计算数据, 将电网侧负序容量满足国标的容量比 β_1 取值代入式(21)中, 即可求得 4 种情况下无功补偿度与电网侧功率因数关系。图 11、图 12 分别为 110 kV、220 kV 电压等级下负载不同时关系图。

根据图 11、图 12 并结合表 1 可以看出 110 kV 电压等级下负载容量为 30 MVA 和 50 MVA 时, 无功补偿度分别为 0.3 和 0.4 电网侧功率因数可以满足国标; 220 kV 等级下负载容量为 90 MVA 和 120 MVA 时, SVG2 仅传递有功不补偿无功时电网侧功率因数也满足国标。此时补偿装置 SVG1、SVG2 容量均明显低于负序、无功完全补偿时的容量。

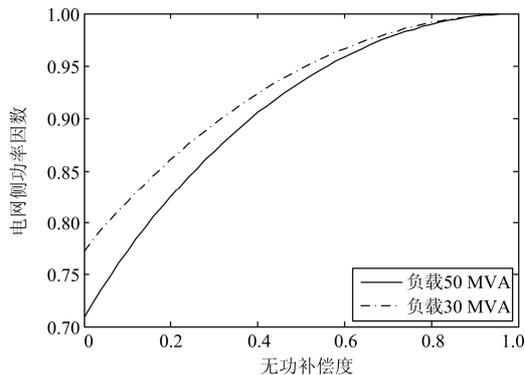


图 11 110 kV 无功补偿度与电网功率因数关系

Fig. 11 Relationship between 110 kV reactive compensation degree and power factor in grid-side

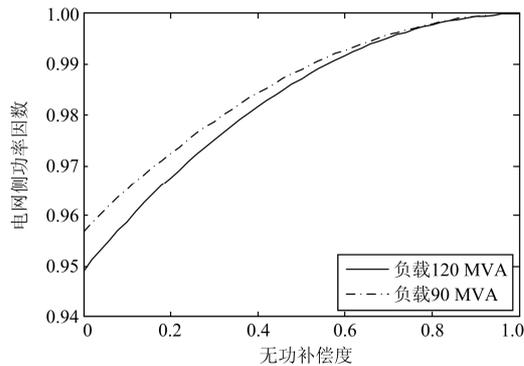


图 12 220 kV 无功补偿度与功率因数关系

Fig. 12 Relationship between 220 kV reactive compensation degree and power factor in grid-side

4 结论

(1) 组合式同相供电系统负序完全补偿时牵引变压器容量和补偿装置容量相等。

(2) 对于高速铁路, 网侧负序满足国标时, 公共连接点处功率因数高于 0.9, 此时 SVG2 只传递有功, 可不补偿无功, 降低装置容量; 对于普速铁路, 无功不满足国标, 需要进行负序和无功的综合补偿优化。

(3) 高速铁路电压等级高, 系统短路容量大, 电网侧负序允许容量大, 所需要的相对补偿容量比普通铁路小。相同电压等级情况下, 负载容量越小, 所需要的补偿装置容量越小。

(4) 对电气化铁路负载无功、负序的满意补偿配置可以显著降低组合式同相供电系统补偿装置的容量, 降低工程造价, 且提高了补偿装置的容量利用率。

参考文献

[1] 许志伟, 罗隆福, 张志文, 等. 一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 265-272.
 XU Zhiwei, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A novel power quality integrated compensator for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 265-272.

[2] 易桂平, 胡仁杰, 蒋玮, 等. 电网电压不平 STATCOM 的影响及抑制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 238-247.
 YI Guiping, HU Renjie, JIANG Wei, et al. Influence of grid voltage unbalance on STATCOM and countermeasure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 238-247.

[3] 吴传平, 罗安, 孙娟, 等. 一种电气化铁路电能质量综合补偿系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 68-76.
 WU Chuanping, LUO An, SUN Juan, et al. A power quality integrated compensation system for electric railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 68-76.

[4] 常非, 赵丽平. 五电平交直交变换器在贯通同相供电中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 26-31.
 CHANG Fei, ZHAO Liping. Application of five-level AC/DC/AC converter on continuous co-phase power supply system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(1): 26-31.

[5] 李群湛, 张进思, 贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报, 1988(4): 23-31.
 LI Qunzhan, ZHANG Jinsi, HE Weijun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction[J]. Journal of the China Railway Society, 1988(4): 23-31.

[6] 张晨萌, 陈柏超, 袁佳歆, 等. 基于 V/V 牵引变压器的同相供电系统电能质量混合补偿研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 496-504.
 ZHANG Chenmeng, CHEN Baichao, YUAN Jiixin, et al. Research on a hybrid compensation system for V/V co-phase railway power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 496-504.

[7] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559-568.
 LI Qunzhan. One new generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways[J].

- Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559-568.
- [8] 张丽艳, 李群湛, 易东, 等. 同相供电系统潮流控制器容量的优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 59-64.
ZHANG Liyan, LI Qunzhan, YI Dong, et al. Capacity optimization of power flow controller used in a co-phase traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 59-64.
- [9] 张秀峰, 吕晓琴, 连级三. 同相牵引供电系统平衡补偿的最优模型[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 841-847.
ZHANG Xiufeng, LÜ Xiaoqin, LIAN Jisan. Optimal compensation models in cophase power supply system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 841-847.
- [10] 王果, 任恩恩, 田铭兴. 不同类型牵引变压器负序电流特性的分析比较[J]. 变压器, 2009, 46(11): 24-27.
WANG Guo, REN Enen, TIAN Mingxing. Analysis and comparison of negative sequence current characteristics of traction transformers[J]. Transformer, 2009, 46(11): 24-27.
- [11] 李群湛. 牵引变电所供电分析及综合补偿技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006: 8-17.
- [12] GB/T15543-2008 电能质量 三相电压不平衡[S].
- [13] 付伟, 刘天琪, 李兴源, 等. 静止无功补偿器运行特性分析和控制方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 147-154.
FU Wei, LIU Tianqi, LI Xingyuan, et al. Analysis of operating characteristic and survey of control methods used in static var compensator[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 147-154.
- [14] 周末, 王果, 等. 适于电气化铁路的三相两臂混合有源补偿研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 100-104.
ZHOU Mo, WANG Guo, et al. Study on hybrid active compensation based on three-phase two-leg inverter for electrification railway[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 100-104.
- [15] 张浩, 周锦, 周荣玲, 等. 基于联合补偿的电网牵引变负序补偿[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 24-28.
ZHANG Hao, ZHOU Jin, ZHOU Rongling, et al. Negative sequence compensation of traction substations based on combined compensation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 24-28.
- [16] 付文秀, 范春菊, FU Wenxiu, 等. SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 61-68.
FU Wenxiu, FAN Chunju, FU Wenxiu, et al. Application of SVG in voltage and reactive power control of doubly-fed induction generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 61-68.
- [17] 季斌炜, 陈潇一. 基于粒子群算法的配电网无功补偿方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 111-114.
JI Binwei, CHEN Xiaoyi. Research on reactive power compensation of distribution network based on particle swarm optimization algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 111-114.
- [18] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
XIN Chunye, LI Guoqing, WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(14): 72-78.

收稿日期: 2015-11-18; 修回日期: 2016-01-18

作者简介:

常文寰(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向电力电子及电力传动、铁道电气化; E-mail: changwenhuanz@126.com

王果(1977-), 女, 副教授, 研究方向是轨道交通供电、电能质量补偿等。E-mail: wangguo2005@eyou.com

(编辑 葛艳娜)