

V/v 牵引供电所混合型电能质量控制系统负序优化补偿策略

马 茜^{1,2}, 谭 磊¹, 罗 培¹

(1. 湘潭大学 信息工程学院, 湖南 湘潭 411105; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为了解决 V/v 牵引供电系统负序和无功等问题, 结合有源和无源的优势, 研究了一种由铁路功率调节器和静止无功补偿器构成的低成本混合型电能质量控制系统。为了在不同负载工况下能够在线实时精确计算最优补偿容量, 首先对混合补偿结构的原理进行分析, 引入了二次侧两臂有功电流大小比 K_I 、有功补偿系数 λ 、负序无功补偿角度 φ , 进行了负序优化补偿的公式推导及理论分析。在一定的负序电压不平衡度下分析了 λ 与 φ 之间的关系式, 推导出有功与无功补偿之间的关系, 并提出一种补偿方案进行容量优化。该方法不需要事先离线计算, 可根据两臂负载情况在线实时精确计算最优补偿容量。实例计算和仿真分析表明了所提方法的正确性和经济性。

关键词: V/v 牵引变压器; 电能质量; 铁路功率调节器; 静止无功补偿器; 混合补偿; 负序优化; 容量优化
中图分类号: TM 714.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.04.019

0 引言

随着高速铁路网的建成, 重载和高速将是我国铁路发展的重点, 电气化铁路中的负序问题因高速铁路牵引功率增大而变得更为突出^[1-3]。由于电气化铁路是单相负荷, 三相系统向它供电时, 负荷产生的负序电流注入系统中, 将引起旋转电机的附加发热和振动, 影响其正常运行, 并带来一些不良后果, 威胁着牵引供电系统和电力系统的安全运行^[4-7]。三相静止无功补偿(SVC)技术和两相式有源装置补偿技术是治理负序的有效措施^[1, 8-9]。本文采用 SVC+ 铁路功率调节器(RPC)混合型补偿装置作为容量优化的研究对象。由于 V/v 牵引变压器接线方式简单, 容量利用率可达 100%, 并已得到广泛应用^[10-11], 故本文针对 V/v 牵引供电系统进行研究。

针对 V/v 牵引供电系统下的容量优化问题, 许多学者提出了不同方案^[11-15], 其中文献[11]分析了补偿后负序电流与各部分补偿容量的关系, 提出混合补偿系统在各种工况下的补偿策略, 但是并没有在某一负序不平衡度的限制下分析有源、无源之间的关系, 未进行最优容量优化分析; 文献[12]提出混合补偿方案, 得出负序补偿策略, 对安装容量进行了优化, 但只适用于一臂重载、一臂空载工况下的最小安装容量计算, 并不能在不同负载工况下实时计算最优的容量补偿方案; 文献[13]采用粒子群优化算法计算 RPC 最小补偿能量所需的有功和无功补偿量, 但需要事先根据不同的工况进行离线计算, 得到最优解后制定补偿度和负荷情况对照表, 而且所取的工况变化步长太大, 无法实现精确的最优化补偿计

算, 难免出现欠补或过补。

本文在分析混合补偿系统结构和负序补偿原理的基础上, 引入二次侧两臂有功电流大小比 K_I 、有功补偿系数 λ 和负序无功补偿角度 φ , 通过实时检测负载工况计算出两臂有功电流大小比 K_I 和负载有功容量 S_L , 并通过在一定的电压负序不平衡度 ε_U 下, 分析出 λ 与 φ 之间的关系, 再利用所需最小 RPC 容量的限定条件, 得出最优补偿的 λ 和 φ 值, 并计算出有源和无源的最优补偿容量。该方案在分析有源、无源补偿关系的基础上, 利用一种简便方法在不同负载工况下在线实时精确计算最优补偿容量, 在系统实际设计中便于实现及工程应用。仿真分析结果表明了该方案的正确性和经济性。

1 V/v 牵引供电系统混合补偿结构

SVC+RPC 混合型补偿结构如图 1 所示。RPC 由共用直流电容的 2 个变流器组成, 并通过降压变压器与牵引供电臂相连接。SVC 由晶闸管控制电抗器(TCR)和各次单调谐滤波支路(FC)组成, 直接与

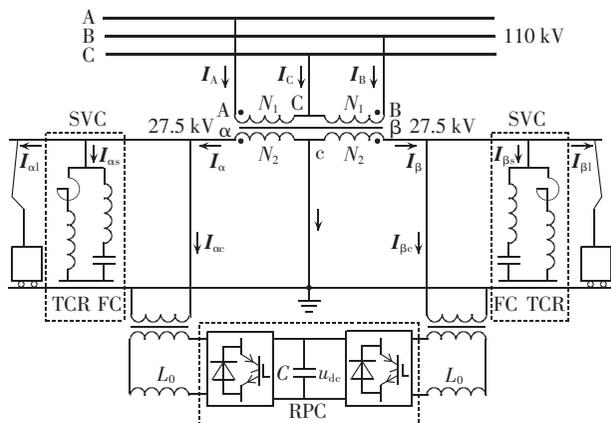


图 1 系统混合补偿结构图

Fig.1 Structure of hybrid compensation system

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2017-01-23
基金项目: 国网湖南省电力公司科技专项计划(5216A515008F)
Project supported by State Grid Hunan Electric Power Company
Special Program of Science and Technology(5216A515008F)

牵引供电臂相连。系统一次侧电压为 110 kV,二次侧电压为 27.5 kV。图中, I_A, I_B, I_C 为 V/v 牵引变压器一次侧三相电流,二次侧左侧为 α 臂,右侧为 β 臂。

一次侧与二次侧电流关系为:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, V/v 牵引变压器变比 $K=N_1/N_2$ 。

TCR+FC 型 SVC 补偿无功可兼滤 3、5、7 次谐波,能够快速跟随牵引负荷频繁的变化,平滑控制输出无功^[1],可在容性和感性之间调节无功补偿大小,所以可以满足无功补偿的要求且造价便宜;RPC 只传递有功,减少了有源补偿装置的容量。

2 负序补偿原理及容量优化分析

2.1 负序优化补偿原理

由于大多数电力机车属于交直型机车,机车功率因数不为 1,且多为感性负载,故先作机车功率因数补偿到 1 的分析。图 2 为机车无功补偿前后的相量图。

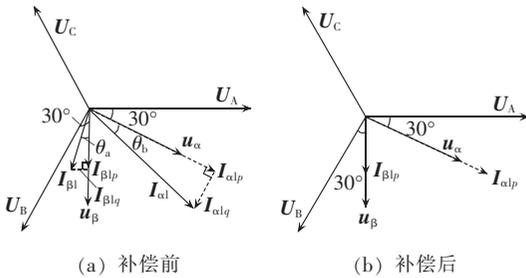


图 2 机车无功补偿前后相量图

Fig.2 Phasor diagrams, with and without locomotive reactive-power compensation

U_A, U_B, U_C 为牵引变压器一次侧三相电压, u_α, u_β 分别为二次侧 α, β 供电臂电压; $I_{\alpha l}, I_{\beta l}$ 分别为两供电臂上负载电流,则有:

$$I_{\alpha l} = I_{\alpha lp} + I_{\alpha lq}, \quad I_{\beta l} = I_{\beta lp} + I_{\beta lq} \quad (2)$$

其中, $I_{\alpha lp}, I_{\alpha lq}$ 分别为 α 臂负载有功、无功电流; $I_{\beta lp}, I_{\beta lq}$ 分别为 β 臂负载有功、无功电流。两臂的负载功率因数角分别为:

$$\theta_a = \arctan \frac{I_{\alpha lq}}{I_{\alpha lp}}, \quad \theta_b = \arctan \frac{I_{\beta lq}}{I_{\beta lp}} \quad (3)$$

假设先将负载功率因数补偿到 1 时, α, β 臂所需补偿无功电流幅值大小分别为 $I_{\alpha lq}, -I_{\beta lq}$ (正为容性,负为感性,方向分别与 $I_{\alpha lq}, I_{\beta lq}$ 方向相反)。

图 3 为负序优化补偿相量图。

机车功率因数为 1 时,二次侧两臂负载有功电流幅值大小分别为 $I_{\alpha lp}, I_{\beta lp}$, 设 $I_{\alpha lp} \geq I_{\beta lp}$, 令 $K_I = I_{\beta lp} / I_{\alpha lp}$, 有 $0 \leq K_I \leq 1$ 。

RPC 用来传递有功电流,将两臂有功电流差值

的一半按补偿系数比例从重载侧转移至轻载侧,有功转移电流增量为:

$$\Delta I_p = \frac{1}{2} \lambda (I_{\alpha lp} - I_{\beta lp}) = \frac{1}{2} \lambda (1 - K_I) I_{\alpha lp} \quad (4)$$

λ 为有功补偿系数,补偿到两臂电流相等时为 1,不补偿时为 0,有 $0 \leq \lambda \leq 1$ 。有功优化补偿后 α, β 两臂负载有功电流幅值大小分别为:

$$I'_{\alpha lp} = I_{\alpha lp} - \frac{I_{\alpha lp} - I_{\beta lp}}{2} \lambda, \quad I'_{\beta lp} = I_{\beta lp} + \frac{I_{\alpha lp} - I_{\beta lp}}{2} \lambda \quad (5)$$

SVC 主要用来补偿无功和滤除部分谐波,并通过控制晶闸管在感性、容性之间调节补偿无功的大小。由图 3 可知, α, β 臂补偿无功电流增量大小分别为:

$$\Delta I_{q\alpha} = \left[\left(1 - \frac{1}{2} \lambda \right) I_{\alpha lp} + \frac{1}{2} \lambda I_{\beta lp} \right] \tan \varphi = \left[1 - (1 - K_I) \frac{\lambda}{2} \right] I_{\alpha lp} \tan \varphi \quad (6)$$

$$\Delta I_{q\beta} = \left[\left(1 - \frac{1}{2} \lambda \right) I_{\beta lp} + \frac{1}{2} \lambda I_{\alpha lp} \right] \tan \varphi = \left[K_I + (1 - K_I) \frac{\lambda}{2} \right] I_{\alpha lp} \tan \varphi \quad (7)$$

两臂总的无功补偿电流增量大小为:

$$\Delta I_{q\alpha\beta} = \Delta I_{q\alpha} + \Delta I_{q\beta} = (1 + K_I) I_{\alpha lp} \tan \varphi \quad (8)$$

φ 为负序无功补偿角度, $0^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$ 。为了分析 φ 与两臂投入的无功总量的关系,上述计算为无功增量之和,暂不考虑容性、感性,后续再分开讨论。

优化补偿后的二次侧两臂电流幅值大小分别为:

$$I'_\alpha = \left[1 - (1 - K_I) \frac{\lambda}{2} \right] I_{\alpha lp} / \cos \varphi \quad (9)$$

$$I'_\beta = \left[K_I + (1 - K_I) \frac{\lambda}{2} \right] I_{\alpha lp} / \cos \varphi \quad (10)$$

α, β 臂电流方向分别为 $e^{j(30^\circ - \varphi)}$ 、 $e^{j(90^\circ + \varphi)}$ 。

2.2 容量优化分析

最大电压负序不平衡度 ε_U :

$$\varepsilon_U = \varepsilon_I S_L / S_d \quad (11)$$

其中, S_L 为负载有功容量; S_d 为系统短路容量。

$$\varepsilon_I = \frac{I}{I^*} = \sqrt{\frac{I_\alpha'^2 + I_\beta'^2 + 2I_\alpha' I_\beta' \cos(2\varphi + 120^\circ)}{I_\alpha'^2 + I_\beta'^2 + 2I_\alpha' I_\beta' \cos(2\varphi)}} \times 100\% \quad (12)$$

由式(9)~(12)可得在一定 ε_U 下, λ 与 φ 的关系式为:

$$\begin{cases} v = \frac{3\cos(2\varphi) + \sqrt{3}\sin(2\varphi) - 2\cos(2\varphi)}{1 - \varepsilon_I^2} \\ \lambda = 1 - \sqrt{1 + 4 \left[K_I - \frac{(1 + K_I)^2}{v + 2} \right] / (1 - K_I)^2} \end{cases} \quad (13)$$

当 $K_I=1$ 时,取极限值 $\lim_{K_I \rightarrow 1} \lambda = 0$; 且 $v=2$ 。

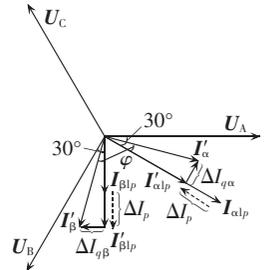


图 3 负序优化补偿相量图
Fig.3 Phasor diagram of optimal negative-sequence compensation

可知, λ 、 φ 只与两臂有功电流大小比 K_I 和最大电压负序不平衡度 ε_U 相关, K_I 为已知量, 将 ε_U 限制为 1% 时, 根据式(11)有 ε_U 为一定值, 所以式(13)中 λ 是关于 φ 的曲线关系函数, 取满足条件的使 RPC 容量最小的点, 即使 λ 最小的点, 设为最优补偿点。

综上所述, 要实现最优容量补偿有:

$$\begin{cases} \min \Delta I_{q\alpha} + \Delta I_{q\beta} + \Delta I_p & \& \min \Delta I_p \\ 0.95 \leq P_s / \sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \leq 1 \\ \varepsilon_U \leq 1\% \end{cases} \quad (14)$$

其中, P_s 、 Q_s 分别为一次侧三相有功、无功之和。由式(14)可得到满足负序不平衡度的最优补偿点, 即最优的有功补偿系数 λ_0 、最优的负序无功补偿角度 φ_0 , 可得转移有功电流幅值大小如式(15)所示, 其方向为重载侧转移至轻载侧。

$$I_{\alpha c} = I_{\beta c} = \frac{1}{2} \lambda_0 (I_{\alpha lp} - I_{\beta lp}) \quad (15)$$

α 臂发出容性无功电流幅值大小如式(16)所示, 其方向与 $I_{\alpha lq}$ 相反。

$$I_{\alpha s} = \left[\left(1 - \frac{1}{2} \lambda_0 \right) I_{\alpha lp} + \frac{1}{2} \lambda_0 I_{\beta lp} \right] \tan \varphi_0 + I_{\alpha lq} \quad (16)$$

令:

$$\Delta I_{q\beta 0} = \left[\left(1 - \frac{1}{2} \lambda_0 \right) I_{\beta lp} + \frac{1}{2} \lambda_0 I_{\alpha lp} \right] \tan \varphi_0 \quad (17)$$

则 β 臂补偿无功电流幅值大小为:

$$I_{\beta s} = I_{\beta lq} - \Delta I_{q\beta 0} \quad (18)$$

若 $I_{\beta s} > 0$, 则为容性, 方向与 $I_{\beta lq}$ 相反; 若 $I_{\beta s} < 0$, 则为感性, 方向与 $I_{\beta lq}$ 相同; 若 $I_{\beta s} = 0$, 则不补偿。

当 α 、 β 两臂负载有功电流有 $I_{\alpha lp} \leq I_{\beta lp}$ 时, 令 $K_I = I_{\alpha lp} / I_{\beta lp}$, 同样有 $0 \leq K_I \leq 1$, 分析原理与上述相同。

3 不同工况下实例计算

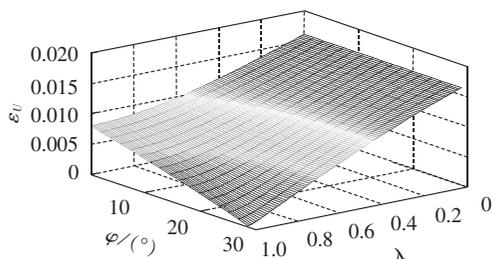
3.1 各变量关系分析

下面在不同工况下对各变量之间的关系进行分析。工况 1: 一臂重载, 一臂空载, 假设 $I_{\alpha l} > I_{\beta l}$, α 臂负载有功 8 MW、无功 4 Mvar, β 臂空载, $K_I = 0$ 。工况 2: 两臂均有负载, 一臂重载, 一臂轻载, 假设 $I_{\alpha l} > I_{\beta l}$, α 臂负载有功 8 MW、无功 4 Mvar, β 臂负载有功 4 MW、无功 2 Mvar, $K_I = 0.5$ 。工况 3: 两臂均为重载, 假设 $I_{\alpha l} = I_{\beta l}$, α 、 β 臂负载皆为有功 8 MW、无功 4 Mvar, $K_I = 1$ 。根据式(9)~(11)可得各工况下 ε_U 与 λ 和 φ 的三维关系图, 如图 4 所示。

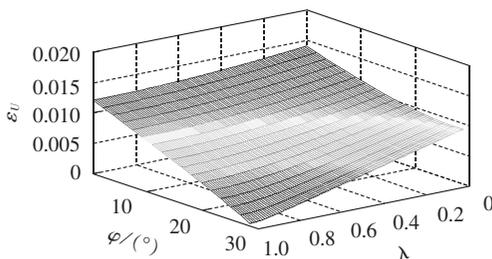
设定 $\varepsilon_U = 1\%$ 时, 由式(12)、(13)可得各工况下 λ 和 φ 的关系曲线如图 5 所示。

根据式(13)可以直接得到使 RPC 容量最小的点为最优补偿点。

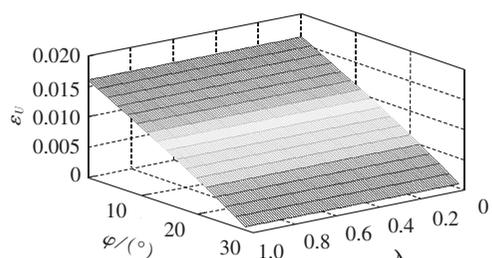
a. 工况 1 下, 最优补偿点 $\lambda_1 = 0.4154$, $\varphi_1 = 22.14^\circ$ 。由式(15)、(16)、(18)可得 RPC 所需转移的有功容



(a) 工况 1



(b) 工况 2



(c) 工况 3

图 4 不同工况下 ε_U 与 λ 、 φ 的关系

Fig.4 Relational graph among ε_U , λ , and φ for different conditions

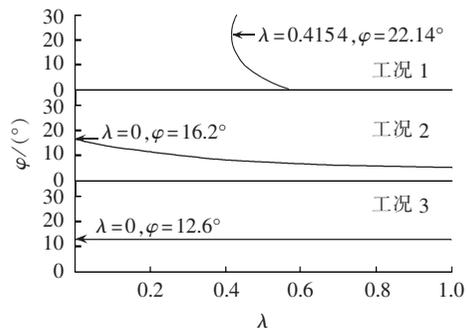


图 5 不同工况下 λ 与 φ 的关系曲线

Fig.5 Relational curve between λ and φ for different conditions

量为 1.66 MW, α 臂需补偿感性无功 6.58 Mvar, β 臂需补偿容性无功 0.675 Mvar。

b. 工况 2 下, 最优补偿点 $\lambda_2 = 0$, $\varphi_2 = 16.2^\circ$ 。RPC 所需转移的有功容量为 0 MW, α 臂需补偿感性无功 6.32 Mvar, β 臂需补偿感性无功 0.838 Mvar。

c. 工况 3 下, 最优补偿点 $\lambda_3 = 0$, $\varphi_3 = 12.6^\circ$ 。RPC 所需转移的有功容量为 0 MW, α 臂需补偿感性无功 5.79 Mvar, β 臂需补偿感性无功 2.21 Mvar。

由以上分析可知, 通过实时检测负载工况, 可以得到 ε_U 与 λ 、 φ 之间的关系, 根据预先设定好的最大

电压负序不平衡度可以得到 λ 与 φ 之间的关系,即可实时计算出最优补偿量大小和方向并进行补偿。

3.2 最小安装容量的计算

下面讨论极端工况下补偿装置的最小安装容量问题。设单臂可能出现最大负载,另一臂为空载,计算在一定电压不平衡度下需补偿的有功、无功容量。

机车功率因数为1,单臂负荷最大为20 MW,另一臂为0 MW,最大电压负序不平衡度设定为1%。由于两臂最大负载出现概率相等,故总的SVC取单臂所需最大值的2倍;对RPC、SVC容量进行价格加权计算成本,一般RPC单位容量价格为SVC的5倍^[11],假设SVC单位容量成本为 x/Mvar ,则各方案^[12-13]容量及成本对比如表1所示。

表1 各方案最小安装容量及成本计算

Table 1 Calculative minimum capacity and cost for different schemes

方案	最小安装容量		成本
	RPC	SVC	
方案1	12.84 MV·A	无	64.20 x
方案2	7.50 MV·A	8.66 Mvar	46.16 x
本文	5.54 MV·A	9.78 Mvar	37.48 x

可见,本文方案的最小安装容量总成本比方案1节约41.6%,比方案2节约18.8%,证明了本文方案采用的混合式补偿结构和容量优化方案的经济性。

4 仿真及验证分析

为了验证本文所采用的容量优化分析的正确性和优越性,在MATLAB/Simulink仿真环境下进行仿真。仿真原理图如图1所示,系统仿真参数:三相电压为110 kV,V/v牵引变压器变比为110:27.5,接入点系统短路容量为500 MV·A,电源频率为50 Hz,降压变压器变比为27.5:3.88,RPC直流电压为4 kV,直流侧电容为0.015 F,SVC输出容量为-7~7 Mvar。

对3.1节的3种实例工况进行仿真验证。为便于观察,在0.06 s投入整套补偿装置,各工况下的一次侧三相电流 i 和电压负序不平衡度 ε_U 如图6所示。

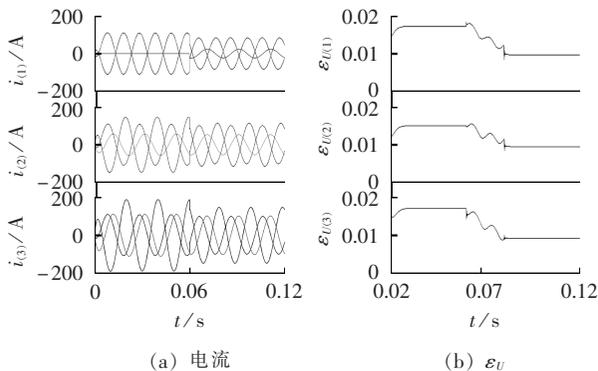


图6 不同工况下的一次侧三相电流和 ε_U 仿真结果

Fig.6 Simulative primary three-phase currents and ε_U for different conditions

可见,一次侧三相电流负序优化补偿效果好,且一次侧的负序电压不平衡度能在补偿装置投入后快速达到设定的1%,功率因数为0.99。仿真结果表明了本文容量优化方案理论分析的正确性。

5 结论

本文采用RPC+SVC混合型补偿装置,与纯RPC补偿系统相比,能够降低装置成本,提高经济性。

本文通过引入二次侧两臂有功电流大小比 K_I 、有功补偿系数 λ 、负序无功补偿角度 φ ,分析了实时计算的 K_I 和预先设定的 ε_U 下 λ 与 φ 之间的关系,并在此基础上推导了有功补偿与无功补偿之间的关系,提出利用一种简单的容量优化方案在线实时精确地计算补偿容量。该方案无需复杂的优化算法,方法简便,易于控制及实现,而且该方法不仅仅局限于机车功率因数为1的情况,便于工程的实际应用。

参考文献:

- [1] 于坤山,周胜军,王同勋,等. 电气化铁路供电与电能质量[M]. 北京:中国电力出版社,2011:3-5.
- [2] 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. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrified railways[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,2014,49(4):559-568.
- [3] 夏焰坤,李群湛,解绍锋,等. 高速和重载电气化铁路V型接线牵引变压器负序补偿研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):73-78.
XIA Yankun,LI Qunzhan,XIE Shaofeng,et al. Negative sequence compensation of high-speed and heavy-haul electric railroad with V connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):73-78.
- [4] 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 Chuaping,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.
- [5] 熊桥坡,罗安,马伏军. 模块化多电平SVG负序补偿容量比较[J]. 中国电机工程学报,2014,34(24):4049-4056.
XIONG Qiaopo,LUO An,MA Fujun. Comparison of negative sequence compensation capacity between SVGs based on modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(24):4049-4056.
- [6] 周星伯,韩民晓,王志春,等. 牵引负荷接入产生的负序分量对近端发电机影响的评估[J]. 电网技术,2013,37(12):3498-3502.
ZHOU Xingbo,HAN Minxiao,WANG Zhichun,et al. Assessment on impact of negative-sequence component on nearby generators due to grid-connected traction load of electrified railway[J]. Power System Technology,2013,37(12):3498-3502.
- [7] 罗培,陈跃辉,罗隆福,等. 静止坐标系下铁路电能质量控制系统控制策略[J]. 高电压技术,2015,41(7):2384-2390.
LUO Pei,CHEN Yuehui,LUO Longfu,et al. Control strategy in a stationary coordinate for railway power quality manage system

- [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2384-2390.
- [8] 邱大强, 李群湛, 余俊祥. 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. Compensation principle of hybrid power quality conditioner for electric railroads and capacity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 59-64.
- [9] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 牵引变电所电能质量混合动态治理技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 48-55.
 ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Hybrid dynamic power quality compensation technology for traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 48-55.
- [10] 王果. 电气化铁路牵引供电系统综合有源补偿研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2011.
 WANG Guo. Research on comprehensive active compensation of electrified rail-way traction power supply system[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2011.
- [11] 吴传平. 电气化铁路供电系统电能质量综合补偿技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
 WU Chuanping. Integrated power quality compensation technology for electrified railway power supply system[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [12] 陈柏超, 张晨萌, 袁傲, 等. 基于V/V牵引供电系统的混合式电能质量补偿研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 60-69.
 CHEN Baichao, ZHANG Chenmeng, YUAN Ao, et al. Research on a hybrid compensation system for V/V high-speed railway power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 60-69.
- [13] 张鑫, 江全元. 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[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 102-108.
 ZHANG Xin, JIANG Quanyuan. Capacity configuration of V/V transformer based railway power conditioner and optimal energy compensation strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 102-108.
- [14] 张志文, 王丹, 胡斯佳, 等. 一种混合型电气化铁道电能质量综合治理系统及其容量分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(12): 89-94.
 ZHANG Zhiwen, WANG Dan, HU Sijia, et al. Hybrid railway power quality improvement system and its power capacity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(12): 89-94.
- [15] ZHANG Dinghua, ZHANG Zhixue, WANG Weian, et al. Negative sequence current optimizing control based on railway static power conditioner in V/v traction power supply system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(1): 200-212.

作者简介:



马 茜

马 茜(1975—),女,湖南株洲人,副教授,博士,主要从事电能质量治理方面的研究工作(E-mail:marcie2015@163.com);

谭 磊(1992—),男,湖南湘乡人,硕士研究生,研究方向为电气化铁路电能质量综合治理(E-mail:tanlei34522@126.com);

罗 培(1974—),男,湖南沅江人,副教授,博士,主要从事电能质量治理方面的研究工作(E-mail:lpmq@163.com)。

Optimal negative-sequence compensation of hybrid power-quality management system for V/v traction substation

MA Qian^{1,2}, TAN Lei¹, LUO Pei¹

(1. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A low-cost hybrid power-quality management system is researched for the negative-sequence and reactive-power compensation of V/v traction power-supply system, which consists of a railway power conditioner with a static var compensator to take the advantages of both active and passive compensation technologies. In order to precisely calculate the optimal compensation capacity in real time and under different working conditions, the principle of hybrid compensation structure is analyzed. The active current ratio(K_I) of two arms at secondary side, the active-power compensation coefficient(λ) and the negative-sequence reactive-power compensation angle(φ) are introduced to carry out the theoretical analysis and derive the formula of optimal negative-sequence compensation. The relationship between λ and φ is analyzed at a certain degree of negative-sequence voltage imbalance, the relationship between active-power compensation and reactive-power compensation is derived, and a compensation scheme is proposed to optimize its capacity, which, without the prior off-line calculation, can online calculate the optimal compensation capacity precisely in real time according to the loads of two arms. The results of case calculation and simulative analysis confirm the correctness and economy of the proposed scheme.

Key words: V/v traction transformer; power quality; railway power conditioner; static var compensator; hybrid compensation; negative-sequence optimization; capacity optimization