

降低电气化铁路混合有源补偿装置有源支路容量的分析

王 果,田铭兴,任恩恩

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对2种电气化铁路有源补偿的拓扑结构,分析了它们的电路构成、补偿目标、有源支路容量和适用的供电方式。提出4种适用于电气化铁路的混合有源补偿拓扑结构,给出了每种拓扑结构的电路构成,分析并推导了各自有源支路的容量计算公式,比较了4种混合有源补偿拓扑的有源支路的容量和电压等级。结果表明,这4种混合有源补偿拓扑均降低了电气化铁路有源支路的容量,它们的拓扑结构是合理可行的。4种混合有源补偿拓扑结构的提出,为混合有源补偿在电气化铁路中谐波、无功和负序综合补偿中的应用,提供了电气化铁路新的综合补偿方案。

关键词: 电气化铁路; 混合有源补偿; 有源支路容量; 电压等级

中图分类号: TM 464; U 223.53

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)09-0018-06

0 引言

电气化铁路供电系统中,单相牵引负荷造成电力系统的不对称运行,所产生的谐波和无功电流给电网及用户带来了严重的危害。电气化铁路谐波的存在,使得牵引变电所附近的串联和并联谐振比例升高,引起保护误动作,造成电力线路、变压器和电机附加损耗增大,牵引机车的出力降低等^[1]。对电气化铁路存在的不对称性、非线性、冲击性和功率因数低的问题,文献[2]提出了有源补偿的解决方法。但是,电气化铁路的电压等级较高,实际运行中供电臂的电压有时甚至比供电臂的额定电压高25%。目前,我国单台电力机车功率最大已经达到9 600 kW。这给有源补偿在电气化铁路中的应用带来了难题,有源支路的容量大且电压等级高^[1-3]。在分析有源滤波器^[4-15]的基础上,提出适用于电气化铁路的混合有源补偿的拓扑,从容量和电压等级2个方面对4种混合有源补偿的结构进行了分析计算,为混合有源补偿在电气化铁路中的应用提供了新的思路。

1 基本假设

假设1:牵引变压器输出电压无畸变。

假设2:不管是有源补偿还是混合有源补偿,均实现谐波和无功功率的综合补偿,牵引变压器两相仅输出相等的基波有功功率。

2 电气化铁路有源补偿的基本原理

2.1 参数定义

为了分析方便,两臂牵引负荷容量分别表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{S}_\alpha = P_{\alpha 1} + jQ_{\alpha 1} + \tilde{S}_{\alpha h} = \\ U_\alpha I_{\alpha 1} \cos \varphi_{\alpha 1} + jU_\alpha I_{\alpha 1} \sin \varphi_{\alpha 1} + U_\alpha \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{\alpha n}^2} \\ \tilde{S}_\beta = P_{\beta 1} + jQ_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h} = \\ U_\beta I_{\beta 1} \cos \varphi_{\beta 1} + jU_\beta I_{\beta 1} \sin \varphi_{\beta 1} + U_\beta \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{\beta n}^2} \end{array} \right. \quad (1)$$

其中, U_α 、 U_β 分别为牵引变压器 α 相和 β 相输出电压的有效值; $I_{\alpha n}$ 、 $I_{\beta n}$ 分别为 α 相和 β 相谐波电流的有效值; $I_{\alpha 1}$ 、 $\varphi_{\alpha 1}$ 分别为 α 相基波电流的有效值及与 α 相电压的相位差; $I_{\beta 1}$ 、 $\varphi_{\beta 1}$ 分别为 β 相基波电流的有效值及与 β 相电压的相位差; $P_{\alpha 1}$ 、 $Q_{\alpha 1}$ 、 $\tilde{S}_{\alpha h}$ 分别为 α 相的有功功率、基波电流产生的无功功率和谐波电流产生的无功功率; $P_{\beta 1}$ 、 $Q_{\beta 1}$ 、 $\tilde{S}_{\beta h}$ 分别为 β 相的有功功率、基波电流产生的无功功率和谐波电流产生的无功功率。

双向变流器实现了完全补偿,变压器的输出功率中只含有有功功率,且等于两臂负荷有功功率的一半。则牵引变压器输出的容量表示为

$$\tilde{S}_{T\alpha} = \tilde{S}_{T\beta} = (P_{\alpha 1} + P_{\beta 1}) / 2 \quad (2)$$

2.2 电气化铁路有源补偿方法 I

图1给出了电气化铁路有源补偿方法I的主电路结构图。有源补偿装置由单相双向变流器,输出滤波器、电容器和耦合变压器构成^[1]。图中, $i_{\alpha 1}$ 、 $i_{\beta 1}$ 分别为 α 相和 β 相牵引负载电流; $i_{\alpha s}$ 、 $i_{\beta s}$ 分别为牵引变压器 α 相和 β 相输出电流; $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 分别为双向变流器 α 相和 β 相侧输出控制电流; u_α 、 u_β 分别为牵引变压器 α 相和 β 相输出电压; C_o 、 L_o 分别为单相双向变流器输出滤波器的电容和电感。

文献[2]对这种有源补偿方式作了详细的描述。日本新干线的能量融通装置就是采用这种形式。现把单相双向变流器等效为2个电流源和支路 Z_c ,其等效电路如图2所示。图中, $\tilde{S}_{B\alpha}$ 为流入单相双向变

收稿日期:2010-01-23;修回日期:2010-05-04

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(096RJZA092);甘肃省教育厅科研基金资助项目(0804-01);甘肃省高等学校基本科研业务费专项资金

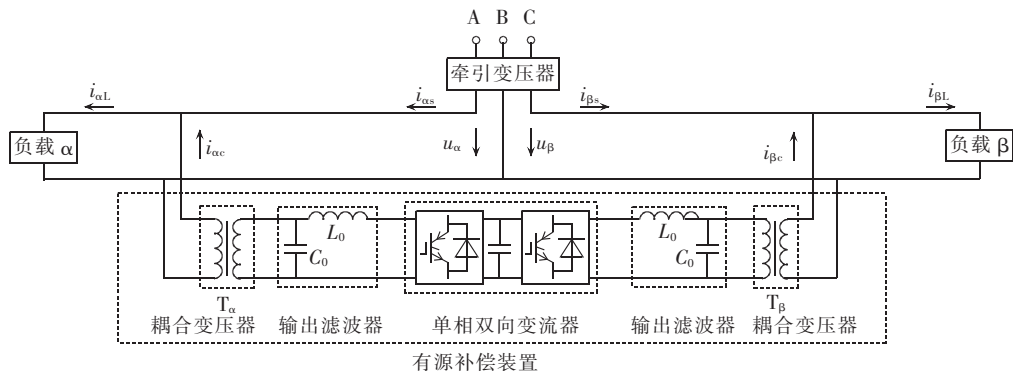


图 1 电气化铁路有源补偿方法 I 主电路结构图

Fig.1 Main circuits of electrification railway active compensation topology I

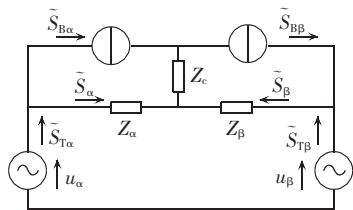


图 2 有源补偿方法 I 的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of topology I

流器的功率; $\tilde{S}_{\beta\beta}$ 为流出单相双向变流器的功率;根据功率守恒有

$$\begin{cases} \tilde{S}_{T\alpha} = \tilde{S}_{B\alpha} + \tilde{S}_{\alpha} \\ \tilde{S}_{T\beta} = \tilde{S}_{\beta} - \tilde{S}_{B\beta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{S}_{B\alpha} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 - j Q_{\alpha 1} - \tilde{S}_{\alpha h} \\ \tilde{S}_{B\beta} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 + j Q_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h} \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出,两臂牵引负荷不相等时,单相双向变流器向两臂供电负荷输出的功率是不相等的。单相双向变流器的容量取最大值来表示,即 $\tilde{S}_B = \max(\tilde{S}_{B\alpha}, \tilde{S}_{B\beta})$ 。若 $\tilde{S}_{\beta} \geq \tilde{S}_{\alpha}$,则

$$\tilde{S}_B = \tilde{S}_{B\beta} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 + j Q_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h} \quad (4)$$

从式(4)可以看出,这种有源补偿结构下的单相双向变流器传输的有功功率为两臂牵引负荷有功功率之差的平均值,传递的无功功率为较大负荷供电臂的无功功率。目前,我国单台电力机车功率最大已经达到 9 600 kW,对单相双向变流器而言,容量还是很大。目前,解决的方法就是采用大容量的无源补偿器件和小容量的有源补偿器件相结合的混合型有源补偿结构。

2.3 电气化铁路有源补偿方法 II

图 3 给出了电气化铁路有源补偿方法 II 的主电路结构图。有源补偿装置由三相电压型变流器、电容器和耦合变压器构成^[4]。

文献[3]对这种有源补偿方式作了详细的描述。有源补偿由三相电压型变流器实现,有源补偿容量的计算用单相电路等效。牵引变压器输出的单相电压用 u 表示,负载用 Z 表示,变流器用受控电流源 i_c 表示,等效电路如图 4 所示。

若 $\tilde{S}_{\beta} \geq \tilde{S}_{\alpha}$,假设负载 Z 就是 Z_{β} ,则单相变流器的容量为

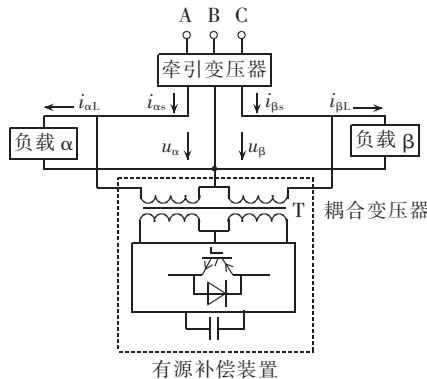


图 3 电气化铁路有源补偿方法 II 主电路结构图

Fig.3 Main circuits of electrification railway active compensation topology II

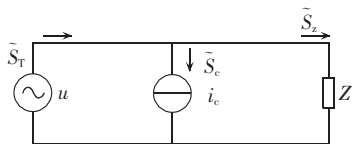


图 4 有源补偿方法 II 的单相等效电路

Fig.4 Single-phase equivalent circuit of topology II

$$\tilde{S}_c = \tilde{S}_T - \tilde{S}_z = (P_{\alpha 1} - P_{\beta 1}) / 2 - j Q_{\beta 1} - \tilde{S}_{\beta h}$$

则三相变流器的容量为

$$\tilde{S}_B = 3\tilde{S}_c = 3[(P_{\alpha 1} - P_{\beta 1}) / 2 - j Q_{\beta 1} - \tilde{S}_{\beta h}] \quad (5)$$

2.4 电气化铁路有源补偿方法比较

电气化铁路有源补偿方法比较列于表 1。

电气化铁路有源补偿方法 I 和方法 II 均可以完成电气化铁路谐波、无功的综合补偿。当牵引变压

表 1 电气化铁路有源补偿方法比较

Tab.1 Comparison of electrification railway active compensation between two methods

有源补偿方法	补偿电路组成	补偿对象	补偿目标	有源支路容量	适用供电方式
I	单相双向变流器、输出滤波器、耦合变压器、电容器	两牵引臂负荷	谐波、无功	小	直供、AT 供电方式
II	三相电压型变流器、耦合变压器、电容器	牵引变压器的三相	谐波、无功和负序电流	大	直供

注:AT 是 Autotransformer feeding system,也称自耦变压器供电方式。

器采用 YN,d11 接线时,方法 I 只能补偿电气化铁路谐波和无功,不能使三相对称;方法 II 可以补偿电气化铁路谐波,无功和负序电流,可以保证三相对称。当牵引变压器采用平衡变压器时,方法 I 和方法 II 均可以补偿电气化铁路谐波、无功和负序电流,可以保证三相对称。在完成同样的补偿目标情况下,方法 I 有源支路的容量小。下面以方法 I 为基础,提出降低有源支路容量的混合有源补偿的方法。

3 电气化铁路混合有源补偿拓扑提出

为了减小有源补偿中变流器的容量,提出如下 4 种混合补偿结构,来减小变流器的容量。电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 I~IV 如图 5~8 所示。

图 5 中,有源支路由图 1 中的单相双向变流器、2 组输出滤波器和 2 个耦合变压器构成;2 条无源支路结构相同,分别由 3 次、5 次、7 次谐波回路,高通滤波器和电容无功补偿元件构成。该结构是在保持电气化铁路原有无源补偿装置不变的基础上,增加有源支路进行基波有功传输和补偿无源支路没有完全补偿的无功、谐波。

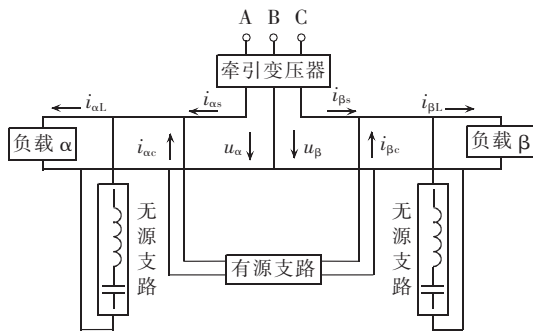


图 5 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 I

Fig.5 Structure of electrification railway hybrid active compensation topology I

图 6 中,有源支路由图 1 中的单相双向变流器、2 组输出滤波器和 2 个耦合变压器构成;3 条无源支路由三相平衡原理(Steinmetz 理论)进行参数配置^[5]。该结构利用三相平衡原理实现三相对称,有源支路补偿负荷变动时谐波和无功。

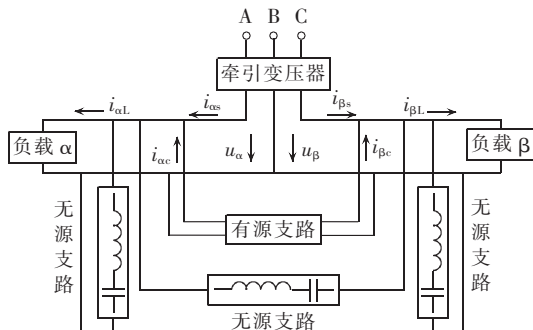


图 6 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 II

Fig.6 Structure of electrification railway hybrid active compensation topology II

图 7 中,有源支路由图 1 中的单相双向变流器、

2 组输出滤波器和 2 个耦合变压器构成;2 条无源支路结构相同,分别由 3 次、5 次、7 次谐波回路,高通滤波器和电容无功补偿元件构成。该结构利用无源支路分担一部分有源支路承受的相电压来降低有源支路的容量^[5-9]。

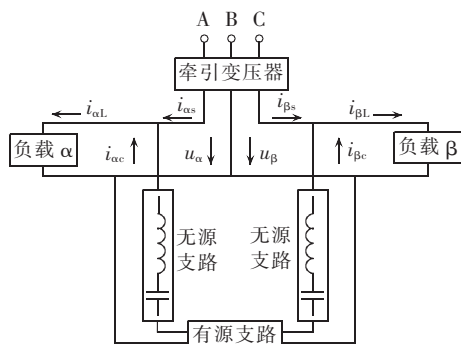


图 7 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 III

Fig.7 Structure of electrification railway hybrid active compensation topology III

图 8 中,有源支路由图 1 中的单相双向变流器、2 组输出滤波器和 2 个耦合变压器构成;无源支路 1 和无源支路 3 结构相同,无源支路 2 和无源支路 4 结构相同^[11-15]。无源支路 1 和 2 可以由以下 3 种方式组成:

- 无源支路 1 由 3 次、5 次、7 次谐波回路、高通滤波器并联组成,无源支路 2 由基波谐振支路构成;
- 无源支路 1 由电容 C 组成,无源支路 2 由电感 L 构成;
- 无源支路 1 由 C 和 L_1 构成,无源支路 2 由电感 L_2 构成。

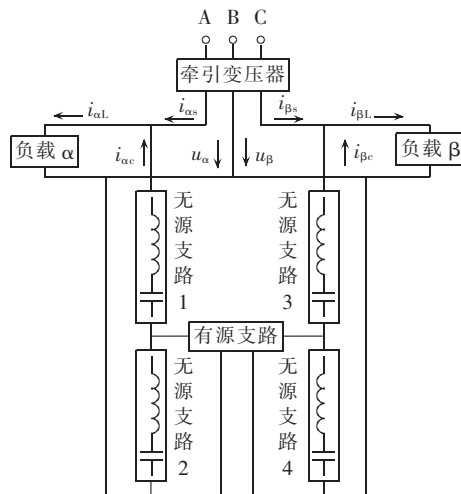


图 8 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 IV

Fig.8 Structure of electrification railway hybrid active compensation topology IV

图 9(a)结构利用无源支路作为补偿电流注入支路,有源支路承受谐波压降,容量大幅降低^[8]。

图 9(b)结构利用电感、电容组成的无源支路注入电网, L 、 C 无源支路调谐在某次谐波,有源支路承受部分谐波压降,降低有源支路的容量。

图9(c)结构中, C 和 L_1 构成5次串联谐振回路, L_1 、 L_2 和 C 构成3次串联谐振回路。有源支路承受 L_2 上部分基波压降和部分3次谐波压降及7次以上谐波压降,降低有源支路的容量^[9]。

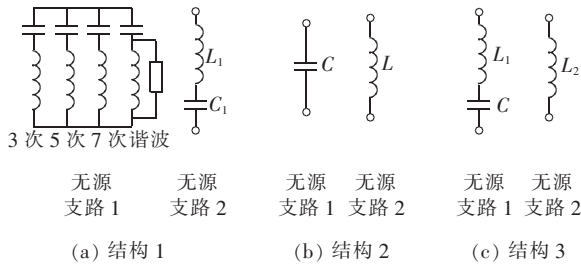


图9 无源支路构成

Fig.9 Structures of reactive part

4 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构的容量分析

4.1 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 I

电气化铁路混合有源补偿拓扑结构 I 的等效电路如图 10 所示。图中, $z_{ph\alpha}$ 、 $z_{ph\beta}$ 分别为 α 相、 β 相无源补偿支路。若两臂无源支路实现了完全补偿,则

$$\begin{cases} \tilde{S}_{ph\alpha} = -jQ_{\alpha 1} - \tilde{S}_{\alpha h} \\ \tilde{S}_{ph\beta} = -jQ_{\beta 1} - \tilde{S}_{\beta h} \end{cases} \quad (5)$$

根据功率守恒,由图 8 可知:

$$\begin{cases} \tilde{S}_{T\alpha} = \tilde{S}_{B\alpha} + \tilde{S}_{\alpha} + \tilde{S}_{ph\alpha} \\ \tilde{S}_{T\beta} = \tilde{S}_{B\beta} + \tilde{S}_{\beta} + \tilde{S}_{ph\beta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{S}_{B\alpha} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 \\ \tilde{S}_{B\beta} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

单相双向变流器的容量为

$$\tilde{S}_B = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 \quad (7)$$

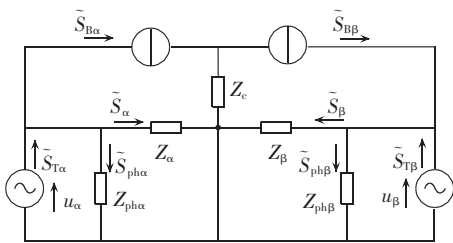


图10 混合有源补偿拓扑结构图 I 的等效电路

Fig.10 Equivalent circuit of hybrid active compensation topology I

4.2 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 II

电气化铁路混合有源补偿拓扑结构 II 的等效电路如图 11 所示。图中, z_{ph2} 、 z_{ph3} 分别为 α 相、 β 相无源补偿支路; z_{ph1} 为 α 相和 β 相之间无源补偿支路。

设 $Z_{\alpha} = R_{\alpha} + jX_{\alpha}$, $Z_{\beta} = R_{\beta} + jX_{\beta}$, 根据 Steinmetz 理论,可得:

$$Z_{ph1} = (j\sqrt{3}R_{\beta}) // (-j\sqrt{3}R_{\alpha})$$

$$Z_{ph2} = (-jX_{\alpha}) // (-j\sqrt{3}R_{\beta})$$

$$Z_{ph3} = (-jX_{\beta}) // (j\sqrt{3}R_{\alpha})$$

其中, $//$ 为 2 个元件的并联符号。

补偿之后,三相电流对称。若负荷保持不变,系统电流是对称的。但是牵引负荷是频繁波动的,所以无源支路无法保证三相对称。这时采用有源支路进行补偿,来保证三相的平衡。

若无源补偿支路实现了系统的完全补偿,则单相双向变流器容量为

$$\tilde{S}_B = 0 \quad (8)$$

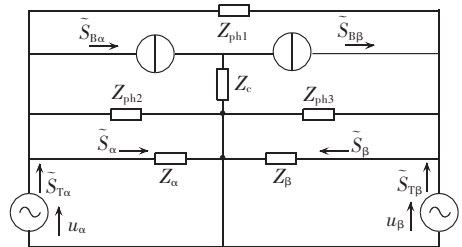


图11 混合有源补偿拓扑结构图 II 的等效电路

Fig.11 Equivalent circuit of hybrid active compensation topology II

4.3 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 III

电气化铁路混合有源补偿拓扑结构 III 的等效电路如图 12 所示。图中, $\tilde{S}_{ph\alpha}$ 、 $\tilde{S}_{ph\beta}$ 分别为流入 α 相、 β 相无源补偿支路消耗的功率。根据功率守恒,由图 10 可知:

$$\begin{cases} \tilde{S}_{T\alpha} = \tilde{S}_{\alpha} + \tilde{S}_{p\alpha} \\ \tilde{S}_{T\beta} = \tilde{S}_{\beta} + \tilde{S}_{p\beta} \\ \tilde{S}_{p\alpha} = \tilde{S}_{ph\alpha} + \tilde{S}_{B\alpha} \\ \tilde{S}_{p\beta} = \tilde{S}_{ph\beta} + \tilde{S}_{B\beta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{S}_{B\alpha} = \frac{(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1})}{2} - jQ_{\alpha 1} - \tilde{S}_{\alpha h} - \tilde{S}_{ph\alpha} \\ \tilde{S}_{B\beta} = \frac{(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1})}{2} + jQ_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h} - \tilde{S}_{ph\beta} \end{cases} \quad (9)$$

若无源支路实现了完全补偿, $\tilde{S}_{ph\alpha} = jQ_{\alpha 1} + \tilde{S}_{\alpha h}$, $\tilde{S}_{ph\beta} = jQ_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h}$, 则单相双向变流器的容量为

$$\tilde{S}_B = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 \quad (10)$$

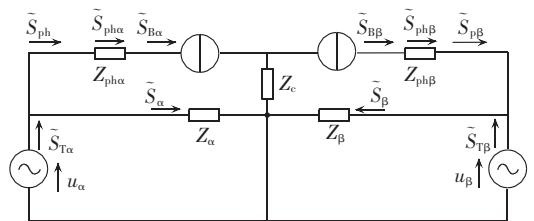


图12 混合有源补偿拓扑结构图 III 的等效电路

Fig.12 Equivalent circuit of hybrid active compensation topology III

4.4 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构图 IV

电气化铁路混合有源补偿拓扑结构 IV 的等效电路如图 13 所示。根据功率守恒,由图 13 可知:

$$\begin{cases} \tilde{S}_{T\alpha} = \tilde{S}_{\alpha} + \tilde{S}_{p\alpha}, \tilde{S}_{p\alpha} = \tilde{S}_{ph1} + \tilde{S}_{ph2} + \tilde{S}_{B\alpha} \\ \tilde{S}_{T\beta} = \tilde{S}_{\beta} + \tilde{S}_{p\beta}, \tilde{S}_{p\beta} = \tilde{S}_{ph3} + \tilde{S}_{ph4} - \tilde{S}_{B\beta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \tilde{S}_{B\alpha} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 - jQ_{\alpha 1} - \tilde{S}_{\alpha h} - \tilde{S}_{ph1} - \tilde{S}_{ph2} \\ \tilde{S}_{B\beta} = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 + jQ_{\beta 1} + \tilde{S}_{\beta h} + \tilde{S}_{ph3} + \tilde{S}_{ph4} \end{cases} \quad (11)$$

若无源补偿支路实现了完全补偿,即

$$\tilde{S}_{ph1} + \tilde{S}_{ph2} = -jQ_{\alpha 1} - \tilde{S}_{ch}, \quad \tilde{S}_{ph3} + \tilde{S}_{ph4} = -jQ_{\beta 1} - \tilde{S}_{bh}$$

则单相双向变流器的容量为

$$\tilde{S}_B = (P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 \quad (12)$$

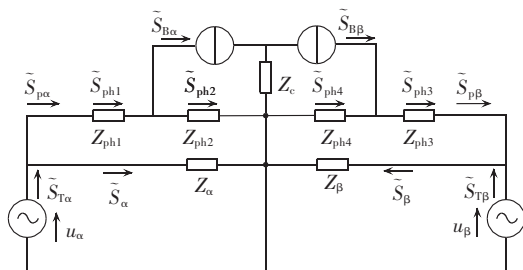


图 13 混合有源补偿拓扑结构图 IV 的等效电路

Fig.13 Equivalent circuit of hybrid active compensation topology IV

5 电气化铁路混合有源补偿拓扑结构的比较

电气化铁路有源补偿和提出的混合有源补偿拓扑结构的比较如表 2 所示。

表 2 混合有源补偿拓扑比较

Tab.2 Comparison of hybrid active compensation among four topologies

拓扑	容量 $\tilde{S}_B$	承受电压 / kV	无源支路个数	复杂程度
有源补偿 I	$(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2 + jQ_{\beta 1} + \tilde{S}_{bh}$	25	0	简单
有源补偿 II	$3 \left(\frac{P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}}{2} - jQ_{\beta 1} - \tilde{S}_{bh} \right)$	25	0	简单
混合有源补偿 I	$(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2$	25	2	复杂
混合有源补偿 II	0	25	3	复杂
混合有源补偿 III	$(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2$	<25	2	复杂
混合有源补偿 IV	$(P_{\beta 1} - P_{\alpha 1}) / 2$	<25	4	复杂

从上分析可知,2 种有源补偿变流器的特点如下:

a. 第 I 种有源补偿变流器补偿的有功功率等于两臂牵引负荷的有功功率之差,补偿的无功功率就是两臂负荷中较大负荷的无功功率;

b. 第 II 种有源补偿变流器的容量是第 I 种有源补偿变流器容量的 3 倍;

c. 有源补偿拓扑 I 明显优于混合有源补偿拓扑。

在第 I 种有源补偿拓扑的基础上,提出了 4 种混合有源拓扑结构,都不同程度地降低了变流器的容量。通过分析可知 5 点。

a. 并联有源补偿拓扑的变流器容量远高于混合有源拓扑结构的有源支路容量。

b. 混合有源拓扑 I、III 和 IV 与有源拓扑相比,降低了有源支路传输谐波功率部分。

c. 混合有源拓扑 II 与有源补偿相比,降低了变流器传输无功功率和有功功率部分。

d. 混合有源拓扑 I 和混合有源拓扑 II,有源支路直接接在两供电臂之间,承受全部的接触网网压 25 kV,有源支路的电压等级较高;混合有源拓扑 III 将有源支路串在无源支路中,并在供电臂上降低了有源支路的电压等级;混合有源补偿拓扑 IV 利用无源

支路作为注入支路,有源支路承担无源支路的部分电压,降低了有源支路的电压等级。

e. 混合有源补偿拓扑 I ~ IV 都在一定程度上降低了有源支路传输的无功功率,但是容量降低的大小,取决于无源支路的参数选择。

当然,文中只是针对这几种拓扑的变流器容量来进行分析,从降低有源支路容量考虑,混合有源补偿拓扑也可以是上面几种拓扑的组合。仅考虑混合有源补偿有源支路的容量,可选择拓扑 I ~ IV。

然而混合有源补偿拓扑的选择,不仅要考虑变流器的容量,还需要考虑混合有源补偿装置的成本。过于复杂的混合有源补偿,虽然降低了有源支路的容量,但却含有过多的无源元件(包括电容、电感),体积和重量较大,成本的优势也会不明显。

6 结论

在分析 2 种电气化有源补偿的基础上,提出了降低有源支路容量的 4 种混合有源补偿方法。提出的拓扑 I 在保持现有电气化铁路无功补偿装置不变的基础上,增加 1 条有源支路即可,这种拓扑结构主要用来传输基波有功功率。提出的拓扑 II 在三相平衡化原理(Steinmetz 理论)补偿的基础上,增加 1 条有源支路,补偿无源支路由于牵引负荷变动时未补偿的功率,来达到降低有源支路元件的容量的目的。提出的混合有源拓扑 III 和 IV,有源支路降低的容量与混合有源拓扑 I 相近,但降低了有源支路的电压。

参考文献:

- [1] PENG F Z. Harmonic sources and filtering approaches[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001(7/8): 18-25.
- [2] 欧阳帆,周有庆,郭自勇. 基于平衡变压器的电流平衡补偿方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(5): 53-57.
OUYANG Fan, ZHOU Youqing, GUO Ziyong. A compensation method for current balance based on balance transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(5): 53-57.
- [3] 鞠建永,徐德鸿. 混合型有源电力滤波器有源部分容量比较[J]. 电源世界, 2007(1): 34-39.
JU Jianyong, XU Dehong. Rating comparison of hybrid-active power filter[J]. The World of Power Supply, 2007(1): 34-39.
- [4] 孙卓,朱东起,姜新建. 牵引变电所新型电能质量调节器的研究[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 41-44.
SUN Zhuo, ZHU Dongqi, JIANG Xinjian. A new traction substation power quality compensator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 41-44.
- [5] 李心广,赖声礼,秦华标,等. 电网的无功及三相不平衡综合补偿研究[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 30-33.
LI Xinguang, LAI Shengli, QIN Huabiao, et al. An approach of integrated compensation for reactive power and three phase unbalance[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 30-33.
- [6] 徐永海,肖湘宁,杨以涵,等. 低成本混合滤波方案及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(12): 5-8, 45.
XU Yonghai, XIAO Xiangning, YANG Yihan, et al. Research on low cost hybrid active filter[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(12): 5-8, 45.
- [7] FUJITA H, AKAGI H. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1991, 27(6): 1020-1025.

- [8] CHENG Potai,BHATTACHARYA S,DIVAN D. Experimental verification of dominant harmonic active filter for high-power applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000,36(2):567-577.
- [9] RIVAS D,MORAN L,DIXON J,et al. A simple control scheme for hybrid active power filter[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution,2002,149(4):485-489.
- [10] RIVAS D,MORAN L,DIXON J W,et al. Improving passive filter compensation performance with active techniques[J]. IEEE Trans Industrial Electronics,2003,50(1):161-170.
- [11] 邓占峰,朱东起,姜新建. 降低有源支路容量的混合电力滤波器[J]. 清华大学学报:自然科学版,2003,43(3):293-295.
DENG Zhanfeng,ZHU Dongqi,JIANG Xinjian. Reduced rating of active filter in hybrid power filter[J]. Journal of Tsinghua University:Sci & Tech,2003,43(3):293-295.
- [12] 郑琼林,路国锋,郝荣泰. 能降低端电压和容量的有源电力滤波器并联混合补偿拓扑结构研究[J]. 北方交通大学学报,1999,23(2):45-48.
ZHENG Qionglin,LU Guofeng,HAO Rongtai. A probe in shunt hybrid-compensator topology with reduced APF's rating and terminal-voltage[J]. Journal of Northern Jiaotong University,1999,23(2):45-48.
- [13] DETJEN D,JACOBS J,de DONCKER R W,et al. A new hybrid filter to dampen resonances and compensate harmonic currents in industrial power systems with power factor correction equipment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2001,16(6):821-827
- [14] ZHANG Changzheng,CHEN Qiaofu,ZHAO Youbin,et al. A novel active power filter for high voltage application[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(2):911-918.
- [15] GRADY W M,SAMOTYJ M J,NOYOLA H. Survey of active power line conditioning methodologies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1990,5(3):1536-1542.

(编辑: 柏英武)

作者简介:

王 果(1977-),女,河南南阳人,博士研究生,研究方向为电气化铁道供电及电能质量等(**E-mail**:wangguo2005@eyou.com);

田铭兴(1968-),男,甘肃民勤人,教授,博士,研究方向为电机器的设计及其控制(**E-mail**:tianmingxing@mail.lzjtu.cn)。

Reduced active part rating of hybrid active compensation for electrification railway

WANG Guo,TIAN Mingxing,REN Enen

(School of Automation and Electrical Engineering,

Lanzhou Jiaotong University,Lanzhou 730070,China)

Abstract: The circuits,compensation target,active part rating and applicable power supply mode of two active compensation topologies are analyzed. Circuits of four hybrid active compensation topologies are proposed and the formula to calculate the active part rating is deduced for each compensation topology. The active part rating and voltage grade are compared among four compensation topologies. Results show that, these four compensation topologies are reasonable and feasible, which, as the new solutions with the active part rating reduced,can be applied to the integrated harmonic,reactive-power and negative-sequence compensation of electrification railway.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Gansu Province(096RJZA092),the Specialized Research Foundation for Department of Education of Gansu Province(0804-01),and the Special Grant of Basic Scientific Research Operational Expense of Colleges and Universities in Gansu Province.

Key words: electrification railway; hybrid active compensation; active part rating; voltage grade