三角形级联固态变压器的多直流电压平衡控制

季振东¹,孙毅超²,金 成³,王建华³,赵剑锋³ (1. 南京理工大学 自动化学院,江苏 南京 210094; 2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042; 3. 东南大学 江苏省智能电网技术与装备重点实验室,江苏 南京 210096)

摘要:级联固态变压器可以直接接入高压配电网,但其存在的直流电压不平衡和功率不均衡问题,将严重影响装置可靠运行。针对三角形级联固态变压器提出了一种多直流电压平衡控制方法,并在建立装置的平均功率模型的基础上,对比分析了其在不同控制方法下的相内和相间功率特性。所提出的方法在满足直流电压平衡和功率均衡调节的同时消除了传统方法中直流变换环节的电流传感器。通过仿真和实验对所提方法的有效性进行了验证,结果表明该方法大幅简化了控制系统,并给装置带来了更好的不平衡无功补偿能力。 关键词:三角形;级联固态变压器;双向主动全桥;多直流电压平衡;功率均衡;电压控制

中图分类号:TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.009

0 引言

固态变压器 SST(Solid State Transformer)利用电 力电子变换和中高频电磁耦合进行电能传递,在完 成传统电力变压器的隔离和电压变换功能的基础 上,还可以实现故障隔离、电能质量治理、直流端口 及电能管理等功能。它具备解决现代电力系统中许 多新问题的潜力,将成为构建智能电网以及未来能 源互联网的关键设备之一^[1-4]。

SST 在发展过程中形成了很多种类型的拓扑结构,其中三级式(AC/DC-DC/AC)拓扑是目前广泛采用的,该类型虽然增加了电能转换级数和开关器件数量,但由于其输入、输出侧均存在直流环节,提升了其对电能的控制灵活度,拓宽了应用范围^[1,3-5]。在中高压大功率领域中,采用三级式结构的级联型SST 成为近年来的研究热点,美国北卡罗莱纳州立大学的 FREEDM (Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)系统^[4,11-12]、ABB 公司的PETT(Power Electronic Traction Transformer)项目^[6]以及美国电科院的 IUT(Intelligent Universal Transformer)项目^[7]均基于该拓扑结构开展了单相级联SST 的研究。而在高压配电网应用中,用三相级联SST 有更好的应用前景,其中三角形级联结构能够实现更大容量和更强的不平衡无功补偿能力^[8]。

级联 SST 的拓扑结构中存在多 H 桥模块串联和多双有源桥 DAB(Dual Active Bridge)模块并联的形式。对各 H 桥模块而言,存在器件参数、损耗以

收稿日期:2018-02-06;修回日期:2018-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51707098);江苏省 自然科学基金资助项目(BK20170841)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51707098) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20170841)

及脉冲延时等差异,连接的电网还有电压不平衡等 因素,这就会造成直流侧电压不平衡的问题^[9],影响 装置的可靠运行;同样在多 DAB 并联系统中,各模 块的损耗、变压器变比以及漏感等会存在偏差,而 这些所导致的电流分配不均衡会造成各模块寿命 不同以及额定负载下部分模块的过流问题^[10]。故 而,级联 SST 在控制中需要解决多直流电压平衡及 功率均衡问题。文献[10-15]中的解决思路是将 级联H桥系统和多DAB并联系统进行分级独立控 制。对于单相级联 SST, 文献 [10-13] 在级联 H 桥 部分中加入了相内直流电压平衡控制,而多 DAB 并联部分采用了均流/均功率控制,这样需要增设 若干电流传感器。而文献[14-15]使用了无电流 传感器的功率均衡控制,DAB 并联系统中的各模 块功率调整直接利用前级电压平衡控制的中间量 进行修正。文献[16-17]针对三角形级联 SST,在 级联H桥中注入零序电流以进行相间直流电压平 衡控制,而 DAB 并联系统仍然采用均电流/功率控 制。由于现有的无电流传感器功率均衡控制无法 进行相间 DAB 模块功率调节,从而难以扩展到三 相系统。另外,当分级独立控制下的级联 SST 应用 于不平衡无功补偿时,三角形级联 H 桥中的开关 器件需要较大的电流裕度^[8]。

本文对适用于三角形级联 SST 的控制策略开展 研究。首先,在分析级联 SST 拓扑和数学模型的基 础上提出了一种多直流电压平衡控制方法,并与传 统方法进行了比较;然后,利用平均功率模型对传统 方法和所提方法下的相内和相间功率特性进行了比 较分析;最后,通过仿真和实验对提出方法的有效性 和可行性进行了验证。

1 数学模型及控制策略

图 1(a) 为本文所研究的三角形级联 SST 的整

体结构框图,三相链节在交流侧连接成三角形,而三 相链节的直流端口直接并联。图1(b)中的每相链 节由多个模块组输入串联、输出并联构成,模块组中 H桥模块和 DAB 模块通过直流端口相连接。图中, *i*_A、*i*_B、*i*_C 为各相并网电流;*i*_{AB}、*i*_{BC}、*i*_{CA} 为各链节电流。 可将三角形级联 SST 按交流级和直流级来进行划 分,交流级为三角形级联 H 桥变流器,直流级为多 DAB 输出并联系统。需要注意的是,本文只研究文 献中三级式结构的前两级,输出的低压逆变环节研 究比较成熟,不在本文的研究范围内。



Fig.1 Topology of cascaded SST with delta configuration

1.1 数学模型

三角形级联 SST 的交流级和直流级均为多端口 系统,庞杂的系统参数造成了数学模型过于复杂,从 而不利用控制系统的设计。为了建立简化的系统平 均数学模型,做如下假设:

a. 各模块组参数完全一致,交流级的电容值均为 C_1 ,直流级输出的电容值均为 C_2 ,中频变压器的变比均为 N_m ,漏抗均为 L_m ;

b. 交流级的各直流电压均衡,即 *u*_{dc} = *u*_{dexi}(*x* = AB, BC, CA;*i*=1,2,…,*n*);

c. 直流级各 DAB 模块采用移相控制,且移相角 一致,即 $\varphi = \varphi_{xi}$;

d. 交流级各相中的 H 桥模块采用相同的占空 比,并且各相链节的总占空比定义为 $D_x = \frac{n}{T_s} \times$ $\int_{t}^{t \to t_s} S_{xi}(\tau) d\tau$,其中 *n* 为级联单元个数, $S_{xi} = -1, 0, 1$ 为 *x* 相 *i* 单元的开关函数, T_s 为开关周期。

在以上假设条件下,各 DAB 模块的原、副边电流分别一致,即 $i_p = i_{pxi} \pm i_s = i_{sxi}$ 。进一步,根据基尔 霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律,得到级联 SST 在开关周期内满足:

$$L \frac{\mathrm{d}\langle i_x \rangle_{T_{\mathrm{s}}}}{\mathrm{d}t} = \langle e_x \rangle_{T_{\mathrm{s}}} - D_x \langle u_{\mathrm{dc}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}}$$
(1)

$$C_{1} \frac{\mathrm{d}\langle u_{\mathrm{dc}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}}}{\mathrm{d}t} = \frac{D_{x}}{n} \langle i_{x} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} - \langle i_{\mathrm{p}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}}$$
(2)

$$8nC_2 \frac{\mathrm{d}\langle u_{\mathrm{dco}}\rangle_{T_{\mathrm{s}}}}{\mathrm{d}t} = 3n\langle i_{\mathrm{s}}\rangle_{T_{\mathrm{s}}} - \frac{\langle u_{\mathrm{dco}}\rangle_{T_{\mathrm{s}}}}{R} \qquad (3)$$

其中,〈 〉_{*r*_s}表示开关周期内的平均值;*e*_x和*i*_x分别为 各相链节的并网电压和电流;*u*_{deo}为直流级输出电 压;*R* 为直流输出端口连接负载的等效阻值。

将式(1)、(2)的 abc 三相平均模型转换到 dq0 旋转坐标系下,可以推导出:

$$\begin{cases} L \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \begin{bmatrix} \langle i_{d} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \\ \langle i_{q} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \\ \langle i_{z} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{d} \\ D_{q} \\ D_{0} \end{bmatrix} \langle u_{\mathrm{dc}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} - \begin{bmatrix} \langle e_{d} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \\ \langle e_{q} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \end{bmatrix} - \\ \begin{bmatrix} 0 & -\omega L & 0 \\ \omega L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle i_{d} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \\ \langle i_{q} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \end{bmatrix} \\ \langle i_{z} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \end{bmatrix} \qquad (4)$$
$$3nC_{1} \frac{\mathrm{d}\langle u_{\mathrm{dc}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}}}{\mathrm{d}t} = D_{d} \langle i_{d} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} + D_{q} \langle i_{q} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} + \\ D_{0} \langle i_{z} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} - 3n \langle i_{\mathrm{p}} \rangle_{T_{\mathrm{s}}} \end{cases}$$

其中, i_d 、 i_q 、 i_z 为三相链节电流在 dq0坐标系下的分量; e_d 、 e_q 、 e_0 为电网线电压在 dq0坐标系下的分量; D_d 、 D_q 、 D_0 为三相链节的总占空在 dq0坐标系下的分量。

据文献[14], DAB 功率 P_{DAB} 在开关周期内表示为:

$$\langle P_{\text{DAB}} \rangle_{T_{s}} = N_{\text{m}} T_{s} \frac{\langle u_{\text{dc}} \rangle_{T_{s}} \langle u_{\text{dco}} \rangle_{T_{s}}}{2\pi L_{\text{m}}} \varphi \left(1 - \frac{\varphi}{\pi} \right)$$
 (5)

令
$$g_{\rm m} = \frac{N_{\rm m}\varphi T_{\rm s}}{2\pi L_{\rm m}} \left(1 - \frac{\varphi}{\pi}\right)$$
,可以得到:
 $\langle i_{\rm p} \rangle_{T_{\rm s}} = \frac{\langle P_{\rm DAB} \rangle_{T_{\rm s}}}{\langle u_{\rm dc} \rangle_{T_{\rm s}}} = g_{\rm m} \langle u_{\rm dco} \rangle_{T_{\rm s}}$
(6)

$$\langle i_{\rm s} \rangle_{T_{\rm s}} = \frac{\langle P_{\rm DAB} \rangle_{T_{\rm s}}}{\langle u_{\rm dco} \rangle_{T_{\rm s}}} = g_{\rm m} \langle u_{\rm dc} \rangle_{T_{\rm s}}$$
(7)

从而可以根据式(3)、(4)、(6)、(7)得到如附

录 A 中图 A1 所示的三角形级联 SST 的简化平均 模型。

1.2 多直流电压平衡控制策略

由简化平均模型可知,三角形级联 SST 的交流 级可以等效为三相电压型脉冲宽度调制(PWM)整 流器,直流级可以等效为单个 DAB。故而,交流级的 整体控制可以采用双闭环解耦控制实现并网电流和 整体直流电压的控制,直流级可使用移相控制方法 以达到输出直流电压的稳定。而对于实现交流级的 多直流电压平衡和直流级的电流均衡,传统控制方 法是将两级独立开来进行控制,在交流级控制系统 中加入相间和相内直流电压平衡控制,同时在直流 级加入均功率/电流控制。本文提出的方法将两级 综合进行考虑,仅需要在直流级控制中加入电压平 衡控制,实现方法如图 2 所示。





Fig.2 Proposed DC voltages balancing control strategy 图 2(a)为交流级的控制方法,用以调节总的直 流电压平均值 \overline{u}_{de} (即 $\sum u_{dexi}/(3n)$)和并网电流。该 部分主要由正序、负序电流解耦控制和零序电流控 制三部分构成,输出形成的各相链节调制波 u_{ab}^{*} 、 u_{ca}^{*} 直接均分 n 份以控制各 H 桥模块。其中, i_{d}^{p} 、 i_{q}^{p} 和 i_{d}^{n} 、 i_{q}^{n} 分别为正序和负序并网电流的 d、q 轴分量。图 2(b)为直流级的控制策略,分为输出直流电压控制 和直流电压平衡控制两部分。输出直流电压 u_{dco} 与 其参考值 u_{dc}^{ref} 经过 PI 调节形成所有 DAB 模块的公 共移相角 φ ,同时各 DAB 模块的输入电压 u_{dcal} 、…、 u_{dcan} 与 \overline{u}_{dc} 经过各自独立的 PI 控制器产生各 DAB 模 块的移相角修正量 $\Delta \varphi_{x1}$ 、…、 $\Delta \varphi_{xn}$,最终输出各单元 移相角 φ_{x1} 、…、 φ_{xn} 。

图 3 为本文所提方法(点划线框部分)与传统方 法(虚线框部分)的对比图。可以看出,在交流级系 统控制中,所提控制方法取消了相间和相内直流电 压平衡控制 2 个部分,大幅降低了该部分的运算量; 而对于直流级系统控制,所提控制方法采用电压平 衡控制,在控制复杂度不变的同时,消除了 DAB 模 块的输出电流采样,减少了控制系统的硬件成本。 第 2 节将具体对 2 种控制方法的功率控制特性进行 分析。



Fig.3 Comparison diagram of conventional and proposed methods for cascaded SST

2 级联型 SST 的功率特性分析

2.1 相内功率分析

附录 A 中图 A2 为级联 SST 的单相链节等效示 意图。图中, E_x 为电网电压有效值; I_x 为并网电流有 效值; m_{x1} 、 m_{x2} 、…、 m_{xn} 为各 H 桥模块的调制比; U_{deo} 为输出直流电压平均值; I_{DCx1} 、 I_{DCx2} 、…、 I_{DCxn} 为各 DAB 输出的电流均值。各模块组的输入有功功 率为:

$$\begin{cases} P_{inx1} = m_{x1} U_{dex1} I_x \cos \theta_{x1} \\ \vdots \\ P_{inxn} = m_{xn} U_{dexn} I_x \cos \theta_{xn} \end{cases}$$
(8)

其中, θ_{x1}、θ_{x2}、…、θ_{xn}为各模块组中 H 桥的输出功率

因数角。各模块组的输出功率为:

$$\begin{cases} P_{ox1} = U_{dco}I_{DCx1} \\ \vdots \\ P_{oxn} = U_{dco}I_{DCxn} \end{cases}$$
(9)

在理想条件下(各模块组效率一致),采用传统的 分级独立控制方法,输出均流/均功率即 $P_{\alpha x1} = P_{\alpha x2} = \cdots = P_{\alpha xn}$,从而各 H 桥等效负载一致,在相内直流电压平 衡控制下其调制波一致,由式(8)可以得到 $U_{dex1} = U_{dexn};$ 而采用提出的多直流电压平衡控制 方法亦可以推导出输出均流/均功率,故而理想条件 下传统方法与所提方法是等效的。进一步,假设 $\eta_{x1},\eta_{x2}, \cdots, \eta_{xn}$ 为各模块组效率。

a. 在传统的分级独立控制下,各模块组输出电流均衡即各模块组的输出功率相等, *P*_{ax1} = *P*_{ax2} = ··· = *P*_{axa}, 从而可以得到:

$$P_{\text{inx1}}\boldsymbol{\eta}_{x1} = P_{\text{inx2}}\boldsymbol{\eta}_{x2} = \dots = P_{\text{inxn}}\boldsymbol{\eta}_{xn} \tag{10}$$

由于交流级在控制下多直流电压保持平衡,即 满足 $U_{dex1} = U_{dex2} = \dots = U_{dexn}$,代入式(8)可得如下 关系:

 $m_{x1}\cos\theta_{x1}\eta_{x1} = m_{x2}\cos\theta_{x2}\eta_{x2} = \dots = m_{xn}\cos\theta_{xn}\eta_{xn} \quad (11)$

从式(11)可以看出,如果各模块工作效率一致,则直流级不会给交流级带来不平衡问题,否则直流级的效率不一致带来的功率不平衡问题需要通过 调节各H桥模块输出电压的有功分量来解决。

b. 在提出的多直流电压平衡控制方法下,交流 级各 H 桥调制波完全一致,即 $m_{x1} = m_{x2} = \cdots = m_{xn}$, cos $\theta_{x1} = \cos \theta_{x2} = \cdots = \cos \theta_{xn}$ 且 $U_{dex1} = U_{dex2} = \cdots = U_{dexn}$,故各模块组的输入功率相等,即 $P_{inx1} = P_{inx2} = \cdots = P_{inxn}$,则:

$$\frac{P_{\text{ox1}}}{\eta_{x1}} = \frac{P_{\text{ox2}}}{\eta_{x2}} = \dots = \frac{P_{\text{oxn}}}{\eta_{xn}}$$
(12)

由于各模块组的输出电压相同,进而可以得到 如下关系:

$$\frac{I_{\text{DCx1}}}{\eta_{x1}} = \frac{I_{\text{DCx2}}}{\eta_{x2}} = \dots = \frac{I_{\text{DCxn}}}{\eta_{xn}}$$
(13)

从式(13)可以得到,当各模块组的工作效率相同时,输出电流保持一致,与并联均流控制达到了一样的控制效果;否则,各模块组输出电流与效率成正比,效率不一致带来的相内功率不均衡问题会通过输出电流体现出来。

2.2 相间功率分析

级联 SST 具有静止同步补偿器(STATCOM)的 功能,需要补偿正序、负序无功电流。而对于传统的 分级独立控制,交流级的2种相间平衡控制方 法——零序电流注入法和分相控制法是等效的^[8], 本文选取零序电流注入法来进行分析。将三角形级 联SST中的线电压、相电流定义如下:

$$\begin{cases} e_{AB} = e_{p}\sin(\omega t) \\ e_{BC} = e_{p}\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ e_{CA} = e_{p}\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$
(14)
$$\begin{cases} i_{AB} = I_{p}\sin(\omega t + \theta_{p}) + I_{n}\sin(\omega t + \theta_{n}) + \\ I_{z}\sin(\omega t + \theta_{z}) \\ i_{BC} = I_{p}\sin(\omega t + \theta_{p} - \frac{2}{3}\pi) + I_{n}\sin(\omega t + \\ \theta_{n} + \frac{2}{3}\pi) + I_{z}\sin(\omega t + \theta_{z}) \\ i_{CA} = I_{p}\sin(\omega t + \theta_{p} + \frac{2}{3}\pi) + I_{n}\sin(\omega t + \\ \theta_{n} - \frac{2}{3}\pi) + I_{z}\sin(\omega t + \theta_{z}) \end{cases}$$
(15)

其中, e_p 为正序电压分量的幅值; I_p 、 I_n 、 I_z 分别为正 序、负序、零序电流的幅值, θ_p 、 θ_n 、 θ_z 则分别为对应 电流分量的相角值。

附录 A 中图 A3 为零序电流注入下的三角形 SST 等效模型,各相链节的输出电压由正序、负序和 零序电压源构成,以产生正序、负序和零序电流。各 相链节输入的有功功率可以由电网输出有功来计 算,并拆分为三部分:各相中相同的有功功率 \overline{P} 、负 序电流产生的有功功率变化量 ΔP_x^{sys} 和各相链节可 调节的有功功率 ΔP_x^{ali} 。各部分表示如下:

$$P_x = \overline{P} + \Delta P_x^{\text{sys}} + \Delta P_x^{\text{adj}} \quad x = AB, BC, CA \quad (16)$$

$$\overline{P} = \frac{1}{2} e_{\rm p} I_{\rm p} \cos \theta_{\rm p} \tag{17}$$

$$\begin{cases} \Delta P_{AB}^{sys} = \frac{e_p I_n}{2} \cos \theta_n \\ \Delta P_{BC}^{sys} = \frac{e_p I_n}{2} \cos \left(\theta_n - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \Delta P_{BC}^{sys} = \frac{e_p I_n}{2} \cos \left(\theta_n - \frac{2}{3} \pi \right) \end{cases}$$
(18)

$$\left\{ \Delta P_{CA}^{asys} = \frac{e_p I_z}{2} \cos \left(\theta_n + \frac{1}{3} \pi \right) \\
\left\{ \Delta P_{AB}^{adj} = \frac{e_p I_z}{2} \cos \theta_z \\
\Delta P_{BC}^{adj} = \frac{e_p I_z}{2} \cos \left(\theta_z + \frac{2}{3} \pi \right) \\
\Delta P_{CA}^{adj} = \frac{e_p I_z}{2} \cos \left(\theta_z - \frac{2}{3} \pi \right) \\
\right\}$$
(19)

由式(16)—(19)可知, $\Delta P_{AB}^{sys} + \Delta P_{BC}^{sys} + \Delta P_{CA}^{sys} = 0 且$ $\Delta P_{AB}^{adj} + \Delta P_{BC}^{adj} + \Delta P_{CA}^{adj} = 0$,因此功率调节量不会对三相 总功率输入产生影响,只会调整功率在三相链节之 间的分配。

当使用传统的分级独立控制方法时,各相链节

输出功率相等,从而需要调整注入的零序电流 I_x 进而调节 ΔP_x^{adj} 使得各相链节输入功率满足:

$$P_{\rm AB}\eta_{\rm AB} = P_{\rm BC}\eta_{\rm BC} = P_{\rm CA}\eta_{\rm CA} \qquad (20)$$

其中, η_{AB}、η_{BC}、η_{CA}为各链节工作效率。而当 SST 仅 用于无功补偿模式时, 直流级处于轻载状态, 故而 DAB 的开关器件易工作于硬开关模式。

当采用提出的多直流电压平衡控制方法时,由 于交流级只控制直流电压平均值,从而不存在功率 调节项 ΔP_x^{adj} ,相间功率不平衡问题 ΔP_x^{sys} 会引入直 流级各相 DAB 模块,不平衡问题最终由直流级的电 压平衡控制予以解决。由于三相 DAB 模块共用输 出直流端口,各相链节的 ΔP_x^{sys} 相互抵消,进而需要 补偿的负序电流对 SST 系统不构成影响。

从以上分析可以看出,采用所提方法进行不平 衡无功补偿,交流级的三角形级联 H 桥不需要提供 额外的电流裕度(零序电流)来进行相间直流电压 平衡控制,同时又充分利用了直流级多 DAB 并联系 统的空闲功率裕量,从而可以避免 DAB 处于轻载状 态,进而有利于满足 DAB 变换器软开关工作 条件^[18]。

综上所述,理想条件下传统方法可以取得和提 出的多直流电压平衡控制方法一样的效果;但当存 在相间功率不平衡因素时,提出的多直流电压平衡 控制方法则比传统方法具有更好的效果,特别是在 不平衡无功补偿方面。

3 仿真分析

为了验证多直流电压平衡控制方法的有效性和 功率特性,通过 MATLAB/Simulink 对三角形级联 SST 进行了有功传输和无功补偿下的仿真分析,并 和传统的分级独立控制进行了对比,具体参数如附 录 B 中表 B1 所示。

3.1 有功传输对比仿真

为了验证有功功率传输特性,级联 SST 直流输 出带载 2.3 Ω ,并通过在各 DAB 变换器中并联电阻 来模拟各模块组不一样的效率($R_{AB1} = 1\ 000\ \Omega$, $R_{AB2} =$ 900 Ω , $R_{AB3} = 1\ 200\ \Omega$; $R_{BC1} = 100\ \Omega$, $R_{BC2} = 80\ \Omega$, $R_{BC3} =$ 130 Ω ; $R_{CA1} = 50\ \Omega$, $R_{CA2} = 60\ \Omega$, $R_{CA3} = 80\ \Omega$)。

由附录 A 中图 A4(a)可以看出,传统方法在直流级采用均流控制,各链节的 DAB 模块平均输出电流接近一致,而其输入电流由于不同的效率而产生了不均衡现象。这样导致各 H 桥模块负载不同,在交流级相间、相内平衡控制的调节下,多模块直流电压保持平衡状态,而各 H 桥调制波和直流电压纹波则不相同。同时,由于零序电流的注入,级联 SST 的三相并网电流一直处于平衡状态。图 A4(b)为所提方法下的仿真波形,由于交流级只控制直流电压均值,各链节中 H 桥调制波相同,故而各模块组输入

功率相同,体现为图中的各相 DAB 模块输入平均电流一致。与此同时,各模块组损耗不同导致各相 DAB 模块输出平均电流不一致,验证了第2节中的效率与功率的关系特性。

3.2 无功补偿对比仿真

为了模拟相间的功率交换, 仿真中只进行负序 电流无功补偿并且 i_a^{n*} 、 i_q^{n*} 呈现周期性变化: $i_a^{n*} = 20 \sin(2\pi t)$, $i_a^{n*} = 20 \cos(2\pi t)$ 。

图 4 为在传统的分级独立控制方法下的负序电 流补偿仿真波形,交流级通过注入零序电流来调节 相间功率并保持直流电压平衡。从图中可以看出, 并网线电流跟随指令值变化,而由于注入零序电流 不断变化导致各链节的相电流大幅波动,符合文献 [8]中所描述的相电流变化规律且最大处为 2 倍的 负序电流。



Fig.4 Waveforms during change of negative-sequence currents with traditional control method

图 5 为在所提方法下的负序电流补偿仿真波 形,图中并网线电流和传统控制方法下的线电流基 本相同,而各链节的相电流与线电流变化规律一致, 并未出现大幅度的波动,且最大相电流波动远小于 传统控制下的波动,验证了所提方法可大幅减少交 流级器件的电流裕度。同时,相间的功率不平衡因 素引入了直流级,直流级各链节 DAB 模块输入和输 出电流均呈现出周期性波动以进行相间有功交换。 仿真表明,采用所提控制方法的三角形级联 SST 具 备更好的不平衡无功补偿能力。

4 试验验证

进一步,通过试验平台对所提出的多直流电压 平衡控制方法进行验证,具体试验参数如附录 B 中 表 B2 所示。

图 6 为有功传输条件下的稳态试验波形。图 6 (a) 为电网相电压 e_A 、并网线电流 i_A 和 i_B 、直流级 输出电压 u_{deo} 的波形;图 6 (b) 为 AB 链节的电网线 电压 e_{AB} 和相电流 i_{AB} 、AB 链节输出的七电平电压





u_{AB}的波形,也说明了相内三单元的直流电压的平衡;图 6(c)为其中一个 DAB 模块的中频变压器原、副边的输入电压及原边的电流波形,副边电压滞后于原边,电能由原边传递至副边;图 6(d)为其中 3 个 DAB 模块的原边电流及输出直流端口的电压波形,3 个 DAB 模块电流平衡且有稳定的输出电压;图





图 6 有功传输下三角形级联 SST 的试验波形 Fig.6 Experimental waveforms of cascaded SST with

delta configuration under active power transmission

6(e)为网侧电压骤降下 e_{AB}、i_{AB}、u_{AB}、u_{deo}的波形,各链节输出电压跟随降低以调整并网电流,输出直流电压在突变过程中保持恒定。

图 7 为三角形级联 SST 用于无功补偿的动态试 验波形。图 7(a) 为补偿无功突变前仅含有正序补 偿指令值的工况下并网侧波形;图 7(b) 为突变后不 平衡无功补偿的工况下并网侧波形;图 7(c) 为动态 变化过程中的各相链节直流电压波形。可以看出,



在无功补偿值突变过程中,各相链节的直流电压经 过微小波动后保持稳定,达到了预期的不平衡无功 补偿效果。

从以上试验可以看出,在传输有功功率时,SST 样机的三相并网电流平衡、各 DAB 模块达到了均流 效果且维持了输出直流端口电压的稳定;无功补偿 突变情况下,各直流电压保持了平衡状态。各试验 波形均符合控制目标,从而验证了提出的多直流电 压平衡控制方法的可行性和有效性。

5 结论

本文针对三角形级联 SST 提出了一种新型的多 直流电压平衡控制方法,该方法对交流级实行平均 直流电压控制,同时在直流级采用直流电压平衡控 制。在实现多直流电压平衡和功率均衡的同时,消 除了多 DAB 并联系统中的电流传感器,降低了控制 系统复杂度,并给装置带来了更好的不平衡无功补 偿能力。通过仿真和试验验证了本文所提控制方法 的可行性和有效性,结果表明所提方法有较好的稳 态和暂态性能,对于其未来在新能源发电并网、机车 牵引、能源互联网等场合的应用具有重要价值。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):1-10.
 WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(4):1-10.
- [2] 刘闯,齐瑞鹏,刘海军,等. 一种减小三相级联型 PET 各中间直流侧电容的方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):46-53.
 LIU Chuang, QI Ruipeng, LIU Haijun, et al. Method of decreasing intermediate DC-link capacitors for three-phase cascaded power electronics transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(11):46-53.
- [3] HUANG A, CROW M, HEYDT G, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management(FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1):133-148.
- [4] XU S. Control and design of a high voltage solid state transformer and its integration with renewable energy resources and microgrid system[D]. Raleigh, USA: North Carolina State University, 2013.
- [5] FALCONES S, MAO X, AYYANAR R. Topology comparison for solid state transformer implementation [C] // Power and Energy Society General Meeting, PES 2010. Minneapolis, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [6] DUJIC D, KIEFERNDORF F, CANALES F, et al. Power electronic traction transformer technology [C] // International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC 2012. Harbin, China: IEEE, 2012:636-642.
- [7] LAI J, MAITRA A, MANSOOR A, et al. Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications [C] // Industry Applications Conference. Hongkong, China: IEEE, 2005; 1893-1899.
- [8] 季振东,孙毅超,李东野,等. 星形和三角形连接的链式 H 桥 STATCOM 不平衡补偿分析[J]. 高电压技术,2015,41(7):

2435-2444.

JI Zhendong, SUN Yichao, LI Dongye, et al. Comparative analysis for unbalance compensation of cascaded H-bridge STATCOMs between star and delta configuration [J]. High Voltage Engineering, 2015,41(7):2435-2444.

 [9] 孙毅超,赵剑锋,季振东.并网型级联H桥变换器直流电压平 衡和功率均衡控制策略[J].电力自动化设备,2014,34(1): 55-60.

SUN Yichao, ZHAO Jianfeng, JI Zhendong. Control strategy of DC voltage balance and power equilibrium for grid-connected cascaded H-bridge converters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1);55-60.

- [10] IMAN-EINI H, FARHANGI S, SCHANEN J. A modular AC/DC rectifier based on cascaded H-bridge rectifier [C] // Power Electronics and Motion Control Conference. Poznan, Poland; IEEE, 2008; 173-180.
- [11] SHI J, GOU W, YUAN H, et al. Research on voltage and power balance control for cascaded modular solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4):1154-1166.
- [12] ZHAO T, WANG G, BHATTACHARYA S, et al. Voltage and power balance control for a cascaded H-bridge converter-based solid-state transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (4):1523-1532.
- [13] 李响,郝瑞祥,游小杰,等.一种级联电力电子变压器直流电压 平衡控制策略[J].电工技术学报,2017,32(2):238-245.
 LI Xiang, HAO Ruixiang, YOU Xiaojie, et al. A DC voltage balance control strategy for the cascaded power electronic transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2):238-245.
- [14] SHE X, HUANG A, NI X. Current sensorless power balance strategy for DC/DC converters in a cascaded multilevel converter based solid state transformer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014,29(1):17-22.
- [15] 王杉杉,王玉斌,林意斐,等. 级联型电力电子变压器电压与功率均衡控制方法[J]. 电工技术学报,2016,31(22):92-99.
 WANG Shanshan, WANG Yubin, LIN Yifei, et al. Voltage and power balance control for cascaded multilevel converter based power electronic transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(22):92-99.
- [16] WANG X, LIU J, OUYANG S, et al. Research on unbalanced-load correction capability of two power electronic transformer topologies
 [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(6): 3044-3056.
- [17] WANG X,LIU J,OUYANG S, et al. Control and experiment of an H-bridge-based three-phase three-stage modular power electronic transformer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (3):2002-2011.
- [18] OGGIER G, GARCIA G, OLIVA A. Switching control strategy to minimize dual active bridge converter losses[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(7):1826-1838.

作者简介:



季振东(1986—),男,江苏东台人,讲师,博士,主要研究方向为电能质量监测、级 联多电平变流器、交流/直流固态变压器 (E-mail:zhendong_ji@126.com);

孙毅超(1987—),男,江苏丹阳人,讲师,博士,主要研究方向为模块化多电平变

流器、固态变压器(E-mail:longquan_18@126.com);

金 成(1989—),男,江苏扬州人,博士研究生,主要研 究方向为电力电子系统稳定性(E-mail:546001658@qq. com);

王建华(1982--),男,江苏海安人,副研究员,博士,主要

研究方向为固态电力电子变压器、虚拟同步发电机及电力电 子系统稳定性(E-mail:Jianhuawang@seu.edu.cn);

赵剑锋(1972—),男,浙江临海人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用 (E-mail:jianfeng_zhao@seu.edu.cn)。

Multi DC voltages balancing control method for cascaded solid state transformer with delta configuration

JI Zhendong¹, SUN Yichao², JIN Cheng³, WANG Jianhua³, ZHAO Jianfeng³

(1. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

3. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Cascaded SST(Solid State Transformer) can be directly connected to the high voltage distribution grid. However, the reliability of cascaded SST is seriously influenced by the DC voltage and power balance problem due to its own configuration. Aiming at the issue, a multi DC voltages balancing control method is proposed for cascaded SST with delta configuration, and the in-phase and inter-phase power characteristics are compared and analyzed with different control methods according to the established average power models. The proposed control method satisfies DC voltage and power balance of three-phase SST while eliminating the current sensor in the traditional DC converter. The simulation and experiment verify the effectiveness of the proposed method. The results show that the proposed method not only simplifies the control system, but also enhances the compensation ability of reactive power. **Key words**: delta configuration; cascaded solid state transformer; dual active bridge; multi DC voltages balance; power balance; voltage control 附录 A















Fig.A3 Equivalent model of three-phase clusters with zero-sequence current injection



Fig.A4 Waveforms under condition of module groups with different efficiencies

附录 B

Table B1 Main parameters of simulated cascaded SST

参数名称	取值
各相级联单元数 n	3
三相系统线电压/V	380
电网频率/Hz	50
直流侧电容值/μF	5 000
开关频率/Hz	1 600
输入电抗值/mH	3
直流电压指令值/V	230
单元等效并联损耗/Ω	10 000
中频变压器变比	1:1
中频变压器漏抗/mH	2.5
输出直流侧电容值/µF	4 000
输出直流电压指令/V	230
开关频率/Hz	1 000

表 B2 三角形级联 SST 试验电路参数

Table B2 Main parameters of experimental cascaded SST

参数名称	取值
各相级联单元数 n	3
三相系统线电压/V	85
电网频率/Hz	50
直流侧电容值/μF	6 667
开关频率/Hz	1 600
输入电抗值/mH	3
直流电压指令值/V	50
单元等效并联损耗/Ω	10 000
中频变压器变比	1:1
中频变压器漏抗/mH	1.8
输出直流侧电容值/µF	6 667
输出直流电压指令/V	50
开关频率/Hz	1 000