

级联 STATCOM 负载不平衡校正能力分析

戴 健¹, 文明浩², 张友强¹, 钟加勇¹, 刘祖建¹

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对星形级联静止同步补偿器 (STATCOM) 校正不平衡负载过程中出现的相间电容电压失衡问题, 分析计算补偿装置各相吸收的有功功率与其输出电流正负序分量之间的关系, 指出负序电流的注入会在级联 STATCOM 三相之间产生不平衡功率, 由此造成相间直流侧电容电压失衡。引入零序电压注入法来解决由负序电流注入校正不平衡负载带来的相间电容电压失衡的问题, 从控制系统不发生调制限制条件, 提出了级联型补偿装置输出不平衡电流能力的计算方法。最后, 搭建 MATLAB/Simulink 仿真模型, 验证了该控制算法的有效性。

关键词: 级联; STATCOM; 直流侧电压平衡; 零序电压注入法; 不平衡校正

DOI: 10.12067/ATEEE1801068

文章编号: 1003-3076(2018)05-0021-08

中图分类号: TM714.3

1 引言

级联多电平变流器具有输出谐波含量低、动态响应速度快、耐压高、容量大等优势, 在高压直流输电、高压大功率静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM) 等领域得到了广泛应用。

针对级联型 STATCOM, 国内外已展开了相关研究。对控制系统指令电流快速、精确地检测是提高 STATCOM 补偿效果的重要环节。文献[1]提出了自适应检测法, 文献[2]提出了一种改进的 FBD 谐波电流检测方法, 文献[3]讨论了网侧电流检测和负载侧电流检测两种方式的优劣, 文献[4]提出了基于瞬时无功功率的检测法, 该方法对指令电流的检测具有良好的动态性能和稳态精度。为了降低 STATCOM 输出的谐波, 除了增加多电平的电平数外, 还应该在主电路上增加输出滤波器。LC 和 LCL 滤波器在并网逆变器中得到了广泛的研究^[5-8], 文献[9]提出一种新型有源阻尼方法, 根据系统并联台数对有源阻尼控制器参数进行自适应调整, 提高了 APF 并联运行系统参数的鲁棒性和系统的稳定性。电流跟踪控制的目标是使得 STATCOM 输出电流实时地跟踪指令电流, 追踪的速度、精度决定了补

偿效果的优劣。

然而, 这些研究主要集中在对指令电流的检测方法、输出滤波器和电流跟踪控制等方面, 对不平衡矫正等问题的研究较少。文献[10, 11]讨论了负载不平衡矫正问题, 但没有分析不平衡校正能力。文献[12]给出了负序补偿能力框图, 但缺少负序补偿能力所受约束的因素及改善的方法, 且对零序电压计算过程的物理意义不够明确。文献[13, 14]只讨论了电压不平衡的问题, 没有涉及负载不平衡矫正问题。文献[15]讨论了补偿不平衡负载的能力, 但其研究重点是针对电力电子变压器, 未分析不平衡补偿能力所受的约束条件。

本文通过控制 STATCOM 输出负序电流完成不平衡负载矫正, 由此引起的链节直流侧不平衡功率由零序电压平衡, 并从功率的角度阐释零序电压注入法的基本原理, 提出了级联型补偿装置输出不平衡电流能力的分析方法。最后, 通过仿真验证所提方法的有效性。

2 补偿电流在 STATCOM 产生的功率

STATCOM 进行无功补偿与负载不平衡校正时, 不仅要输出正序的无功电流, 还需要针对不平衡负

收稿日期: 2018-01-25

作者简介: 戴 健(1991-), 男, 湖北籍, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用;
文明浩(1973-), 男, 湖南籍, 教授, 博士, 研究方向为电力电子技术、新型继电保护原理。

荷输出负序电流。级联型 STATCOM 各个模块都具有独立的直流电容,负序电流会对各个模块直流侧的有功功率产生影响,从而造成各相模块之间的电压失衡问题,最终导致补偿装置不能正常运行。因此,级联型 STATCOM 对不平衡负荷的校正问题,实质上是对补偿装置各相功率单元直流侧之间电压的均衡问题。

2.1 级联 STATCOM 模型

补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 的参考方向从系统流向 STATCOM,连接电抗器的电感、电阻分别为 R 、 L ,公共连接点相电压为 u_a 、 u_b 、 u_c ,系统拓扑结构如图 1 所示。

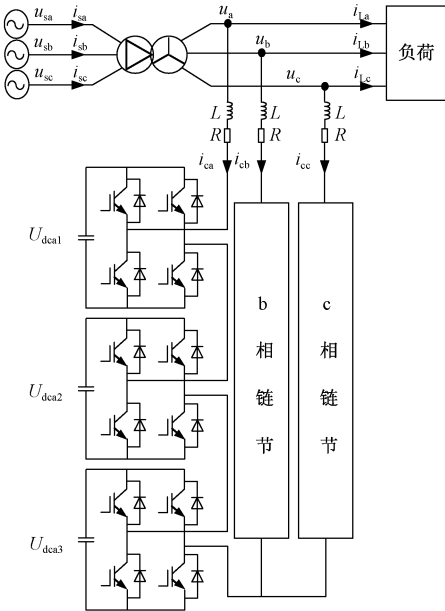


图 1 系统拓扑结构

Fig.1 Structure of system

将 u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 分别设为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^p \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc}^p \\ I_{qc}^p \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc}^n \\ I_{qc}^n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, V_d^p 为正序电压 d 轴分量; I_{dc}^p 、 I_{qc}^p 分别为正序电流的 d 轴和 q 轴分量; I_{dc}^n 、 I_{qc}^n 分别为负序电流的 d 轴和 q 轴分量。

2.2 正、负序电流产生的功率

在 STATCOM 实际工作中,连接电抗器上的压降很小,若无零序电压,STATCOM 的中性点对系统中性点的电压为零,因此,补偿装置每相链节所承受的电压近似为连接点处的电压。电网与 STATCOM 之间的平均功率可表示为(以 a 相为例,b、c 相类似):

$$P_a = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} u_a i_{ca} dt \quad (3)$$

将式(1)、式(2)代入式(3)中,得到 STATCOM 补偿电流在每相链节中的功率为:

$$\begin{cases} P_a = \frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^p - \frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^n \\ P_b = \frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^p + \frac{1}{4} V_d^p I_{dc}^n + \frac{\sqrt{3}}{4} V_d^p I_{qc}^n \\ P_c = \frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^p + \frac{1}{4} V_d^p I_{dc}^n - \frac{\sqrt{3}}{4} V_d^p I_{qc}^n \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中功率可分为两部分:第一部分由补偿电流正序分量产生,记为 P_{loss} ,如式(5)所示;第二部分由补偿电流负序分量产生,记为 P_{na} 、 P_{nb} 、 P_{nc} ,如式(6)所示。

$$P_{loss} = \frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^p \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{na} = -\frac{1}{2} V_d^p I_{dc}^n \\ P_{nb} = \frac{1}{4} V_d^p I_{dc}^n + \frac{\sqrt{3}}{4} V_d^p I_{qc}^n \\ P_{nc} = \frac{1}{4} V_d^p I_{dc}^n - \frac{\sqrt{3}}{4} V_d^p I_{qc}^n \end{cases} \quad (6)$$

补偿装置工作过程中,开关器件会产生开通损耗、关断损耗,连接电抗器也会消耗一部分有功功率,该损耗的功率由正序部分 d 轴分量提供,即 P_{loss} 提供器件功率损耗,维持电容电压在指令值附近。

由式(6)可以看出,负序电流和输出电压产生的三相功率之和为零,即负序电流所产生的功率不与电网发生功率交换。同时,补偿装置输出的负序

电流在每相单元模块中产生的功率是有差异的,这些功率的交换都是发生在电网与各相模块直流电容之间,若不采取措施,这些大小不等的功率交换势必会造成各相模块间直流电容电压大小不相等,显然这是补偿装置稳定工作所不允许的。因此有必要采取相间均压措施来抵消各相之间有差异的功率。

3 基于零序电压注入法的相间均压控制

级联型 STATCOM 输出负序电流导致链节相间电容电压的失衡,本文采用零序电压注入法,实现对负序电流产生的不平衡功率补偿。同时,根据每相直流侧电容电压的状态进行调整,使得各相直流侧电容电压平均值趋近于所有模块直流侧电容电压的平均值。

3.1 零序电压在链节中产生的功率

零序电压注入法是在 STATCOM 的每相链节上叠加一个零序电压,在控制系统中的实现是将某一恰当的零序电压 v_0 叠加到每相调制波中,因此每相链节输出电压中都包含有零序电压。零序电压注入原理如图 2 所示。由于电网电压钳位的作用,点 M_a 对地电压近似为 u_a (以 a 相为例),则 STATCOM 中性点 O_c 对地电压为 $-v_0$ 。零序电压注入所产生的功率交换发生在三相之间,与电网之间没有功率交换,即沿着 STATCOM 中性点 O_c 发生功率交换。

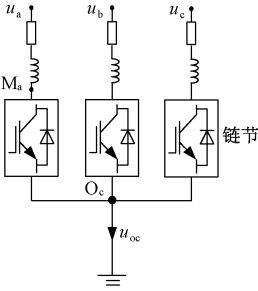


图 2 零序电压注入原理

Fig. 2 Principle of zero sequence voltage injection

零序电压注入目的是抵消负序电流和正序电压之间产生的不平衡功率。设定注入的零序电压为:

$$v_0 = V_0 \sin(\omega t + \gamma) \quad (7)$$

式中, V_0 为零序电压幅值; γ 为零序电压初相位。零序电压与补偿电流产生的平均功率 P_{m0} ($m = a, b, c$) 可表示为:

$$P_{m0} = \frac{1}{T} \int_{\tau}^{\tau+T} v_0 i_{cm} dt \quad m = a, b, c \quad (8)$$

由基尔霍夫电流定律可知, i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc} 的和为零,

则 $P_{a0} + P_{b0} + P_{c0} = 0$, 即零序电压与 abc 三相电流之间产生的功率之和为零, 由此证明零序电压注入法产生的功率流动是发生在三相之间的, 与电网没有功率交换。

将式(2)、式(7)代入式(8)中, 可得到注入零序电压与补偿电流在各相中产生的功率为:

$$\begin{bmatrix} P_{a0} \\ P_{b0} \\ P_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-I_{dc}^n + I_{dc}^p}{2} & \frac{I_{qc}^n + I_{qc}^p}{2} \\ \frac{I_{dc}^n - \sqrt{3}I_{qc}^n - I_{dc}^p + \sqrt{3}I_{qc}^p}{4} & \frac{-\sqrt{3}I_{dc}^n - I_{qc}^n - \sqrt{3}I_{dc}^p - I_{qc}^p}{4} \\ \frac{I_{dc}^n + \sqrt{3}I_{qc}^n - I_{dc}^p - \sqrt{3}I_{qc}^p}{4} & \frac{\sqrt{3}I_{dc}^n - I_{qc}^n + \sqrt{3}I_{dc}^p - I_{qc}^p}{4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_0 \cos \gamma \\ V_0 \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (9)$$

3.2 基于功率平衡的零序电压计算方法

在 2.2 节、3.1 节分别讨论了负序电流和零序电压在各相中产生的不平衡功率, 若这两种不平衡的功率相互抵消, 即满足 $P_{nm} + P_{m0} = 0$ ($m = a, b, c$) 时, 三相链节功率达到平衡。

此外, 链节各相之间开关器件的损耗可能存在差异, 各相触发脉冲存在延时等都会导致三相之间直流侧电容电压出现偏移。因此, 零序电压还需要根据电容电压状态实时调整链节功率, 促使三相链节电容电压平衡。

为便于计算, 将式(9)进行 $\alpha\beta$ 坐标变换, 得到:

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha 0} \\ P_{\beta 0} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -I_{dc}^n + I_{dc}^p & I_{qc}^n + I_{qc}^p \\ -I_{qc}^n + I_{qc}^p & -I_{dc}^n - I_{dc}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \cos \gamma \\ V_0 \sin \gamma \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(10)可得到零序电压为:

$$\begin{bmatrix} V_0 \cos \gamma \\ V_0 \sin \gamma \end{bmatrix} = \frac{2}{(I_{dc}^p)^2 + (I_{qc}^p)^2 - (I_{dc}^n)^2 - (I_{qc}^n)^2} \cdot \begin{bmatrix} I_{dc}^n + I_{dc}^p & I_{qc}^n + I_{qc}^p \\ -I_{qc}^n + I_{qc}^p & I_{dc}^n - I_{dc}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{\alpha 0} \\ P_{\beta 0} \end{bmatrix} \quad (11)$$

基于零序电压注入法的相间均压控制如图 3 所示。其中, u_{dca} 、 u_{dcb} 、 u_{dcc} 分别为各相链节电容电压均值; u_{dc} 为所有直流侧电容电压均值。相间平衡前馈控制环节实现对负序电流产生的不平衡功率补偿; 相间平衡反馈控制实现对各相电容电压的状态实时地调整。

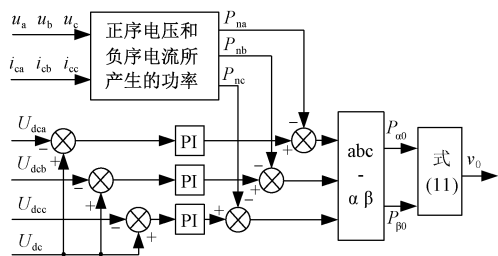


图3 零序电压计算

Fig. 3 Calculation of zero sequence voltage

3.3 不平衡补偿能力分析

正常运行的 STATCOM 可输出正序电流、负序电流。然而,输出的负序电流并不是任意大小的,从 3.2 节分析中也可以看出,当输出的正序电流和负序电流大小相等时,计算得到的零序电压是无穷大,显然实际工作的 STATCOM 受硬件系统绝缘等各方面的约束,不可能产生无穷大零序电压。同时,从控制系统来看,因为计算得到的零序电压是叠加到调制波中的,若零序电压过大,将会导致含有零序分量的调制波幅值大于载波幅值,即发生过调制,此时控制系统将不能正常工作,STATCOM 系统就不能正常运行。本文从控制系统不发生过调制的约束条件来分析 STATCOM 不平衡补偿能力。

由式(11)可以看出,注入的零序电压与流过补偿装置的负序电流紧密相关,为了方便研究,首先需要推导出零序电压与补偿装置输出电流的不平衡度之间的关系。

对不平衡度的定义有很多,比较常见的一种定义是负序电流有效值与正序电流有效值的比值。记补偿电流的不平衡度为 k ,流入到补偿装置中的负序电流记为 I_n ,正序电流记为 I_p ,如式(12)所示:

$$\begin{cases} I_n = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{qc}^2} \\ I_p = \sqrt{I_{dc}^2 + I_{qc}^2} \end{cases} \quad (12)$$

式(2)经正负序的 dq 坐标变换,可以得到正负序电流与其 dq 轴分量的关系为:

$$\begin{cases} I_{dc}^n = -I_n \cos \theta_n \\ I_{qc}^n = -I_n \sin \theta_n \\ I_{dc}^p = -I_p \cos \theta_p \\ I_{qc}^p = -I_p \sin \theta_p \end{cases} \quad (13)$$

同理可得公共连接点正序电压 V^p 与其 dq 轴分量的关系为 $V^p = V_d^p$ 。

STATCOM 正常工作时,各相直流侧电容电压平均值都很接近指令值。因此,相间平衡反馈控制环

节产生的控制量很小,可以忽略,零序电压主要受相间平衡前馈控制影响,即 $P_{nm} = -P_{m0}$ ($m = a, b, c$)。

将式(6)变换到 $\alpha\beta$ 坐标系中,则可得到 $\alpha\beta$ 坐标系零序电压需要调整的功率:

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha 0} \\ P_{\beta 0} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} P_{n\alpha} \\ P_{n\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -V_d^p I_n \cos \theta_n \\ V_d^p I_n \sin \theta_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(12)、式(13)、式(14)代入式(11)中,从而可以得到注入的零序电压幅值和补偿电流不平衡度之间的关系为:

$$\frac{V_0}{V^p} = \frac{k}{|1 - k^2|} \sqrt{k^2 - 2k \cos(3\theta_n - \theta_p) + 1} \quad (15)$$

式(15)成立的条件是 k 不等于 1,即补偿电流的正序分量与负序分量不相等。由于正序电流有功分量很小,与无功分量相比可忽略,因此 θ_p 近似为 $\pm \pi/2$ 。

因为 $-1 \leq \cos(3\theta_n - \theta_p) \leq 1$,所以式(15)可转化为:

$$\begin{cases} \frac{k |1 - k|}{|1 - k^2|} \leq \frac{V_0}{V^p} \\ \frac{V_0}{V^p} \leq \frac{k(k+1)}{|1 - k^2|} \end{cases} \quad (16)$$

零序电压 V_0 过大,将会导致调制波幅值过大,从而发生过调制的问题,为此需要分析临界发生过调制时的零序电压有多大。

记调制波幅值为 V_{cm} ,载波幅值为 V_{cm} ,直流侧总电压为 V_D ,由于连接电抗器上的基波压降很小,补偿装置输出基波电压幅值近似为 V^p ,则调制比 M 为:

$$M = \frac{V_{cm}}{V_{cm}} = \frac{V^p}{V_D} \quad (17)$$

设 $V^p/V_{cm} = x$,即对应输出电压为 V^p 时所需调制波大小为 V^p/x ,同时也有 $V_D/V_{cm} = x$,代入式(17)得:

$$V_{cm} = \frac{V^p}{Mx} \quad (18)$$

由于调制波中叠加了零序分量,则补偿装置两端(输出点到补偿装置中性点)的电压最大为 $V^p + V_0$,对应此输出的调制波为 $(V^p + V_0)/x$ 。

正常运行时,调制波最大值都应小于载波幅值,则:

$$V_{cm} = \frac{V^p}{Mx} > \frac{V^p + V_0}{x} \quad (19)$$

因此,得到零序电压后控制系统不发生过调制

的约束条件为:

$$\frac{V_0}{V^p} < \frac{1-M}{M} \quad (20)$$

联立式(16)、式(20),当注入的零序电压满足 $k < 1-M$ 时,式(20)恒成立,控制系统不发生调制,因此零序电压注入可以实现链节相间均压。

以调制度 $M=0.75$ 为例:

当 $k > \frac{1}{2}$ 时, $\frac{V_0}{V^p} \geq \frac{k|1-k|}{|1-k^2|} > \frac{1}{3}$, 不满足式(20)的约束条件,控制系统必定发生过调制。

当 $\frac{1}{4} \leq k \leq \frac{1}{2}$ 时,是否发生过调制还需按照式(15)计算,并与 $1/3$ 比较。

当 $k < \frac{1}{4}$ 时, $\frac{V_0}{V^p} \leq \frac{k(k+1)}{|1-k^2|} < \frac{1}{3}$, 必定满足式(20)的约束条件,控制系统不会发生过调制。

由此可得,星形级联 STATCOM 的不平衡补偿能力与控制系统调制度有关,调制度越大,不平衡补偿能力越小,调制度越小,不平衡补偿能力越大。

3.4 考虑不平衡补偿能力的控制器设计

STATCOM 的基本功能应能完成负载无功补偿与不平衡校正,然而对于不平衡度过大(按无功电流计算)的负载,零序电压注入法可能无法实现相间电容电压均衡。为此,本节针对不同的控制目标,设计出 STATCOM 相应的控制流程,如图4所示。其中,下标中 d、q 分别表示有功和无功分量;下标 cref 表示指令值;下标 L 表示负载相关电气量。

4 负载不平衡校正综合控制系统

4.1 综合控制策略

补偿装置的补偿性能在很大程度上取决于其控制系统,而控制系统主要包含正负序电流的 dq 分量检测、直流侧电容电压均压以及补偿电流指令值的跟踪控制。

级联型 STATCOM 系统正常工作的前提条件是补偿装置三相链节的直流侧电容电压都处于指令值附近。正负序电流的 dq 分量检测将在 4.2 节讨论。

本文采用分层均压控制实现直流侧电容电压平衡。顶层控制使得三相所有功率单元直流侧电容电压的平均值都处于指令值附近;相间均压控制能使得各相功率单元直流侧电容电压的平均值处于所有功率单元电容电压的均值附近,控制方法为 3.2 节讨论的零序电压注入法;保证相内各模块的电容电压都接近该相电容电压的平均值,则各模块的电容

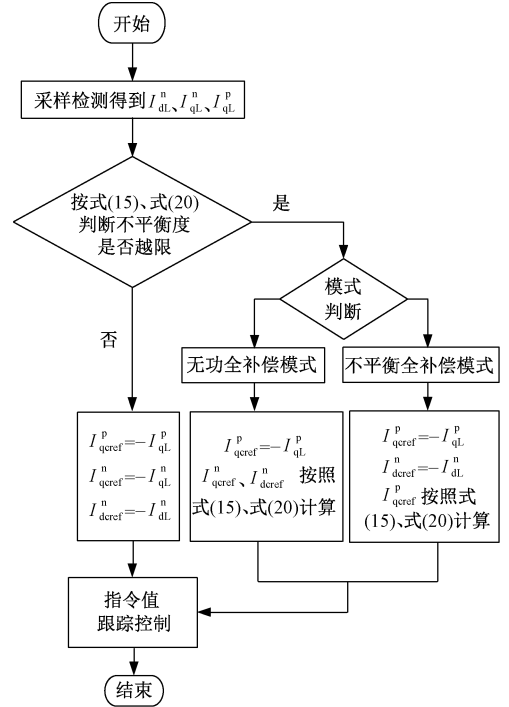


图4 考虑不平衡能力的 STATCOM 控制流程

Fig. 4 STATCOM control process considering unbalance load correction capability

电压都会处于指令值附近,底层控制实现的是相内均压控制,将在 4.3 节讨论。

指令值的跟踪控制采用前馈解耦控制策略,实现对正负序 dq 轴分量解耦控制,完整的控制策略如图5所示。其中 u_{dcmn} 表示补偿装置 m 相第 n ($n=1, 2, 3, \dots$) 个单元直流侧电容电压。

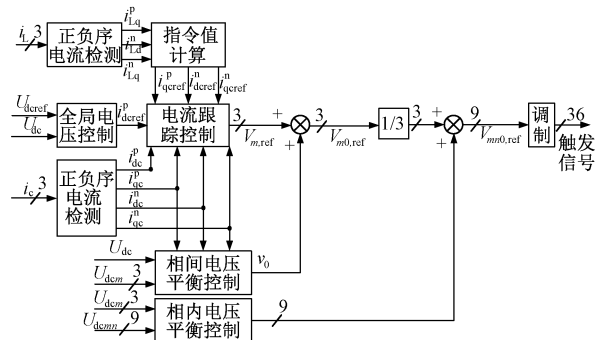


图5 STATCOM 系统综合控制策略

Fig. 5 Comprehensive control strategy of system

4.2 正负序电流的 dq 分量检测

采用基于正负序的 dq 坐标变换完成对指令值的检测问题。经正序 dq 坐标变换后,电流正序分量变成直流量,负序分量变成了二倍频交流量;经负序 dq 坐标变换后,正序电流变成了二倍频交流量,负

序电流变成直流量。利用陷波器,完成对二倍频交流量的滤除,即可完成对正负序的分离。检测框图如图 6 所示。

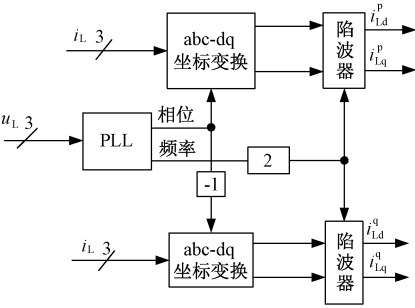


图 6 正负序电流检测

Fig. 6 dq-axis component detection of positive and negative sequence current

4.3 相内均压控制策略

相内均压实现对每个功率单元直流电容电压的调整,功率流动的过程为:该相直流电容电压较高的功率单元流向直流电容电压较低的功率单元。控制策略如图 7 所示。

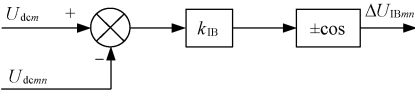


图 7 相内均压控制策略

Fig. 7 DC voltage control strategy in-phase

其中,cos 表示某相补偿装置接入点处相电压相位的余弦函数,其正负号取决于 i_{cq} 的符号,若 i_{cq} 为正值,则取正号;若 i_{cq} 为负值,则取负号。 k_{IB} 为比例调节器系数; ΔU_{IBmn} 为该模块的相内电压均压控制产生的调节量,叠加在该模块的调制波中。因此,若某一模块直流电压低于该相直流电压平均值,则 $U_{dcm} - U_{dcmn} > 0$,与 cos 函数相乘后产生的控制量 ΔU_{IBmn} 与 i_{cq} 同相位,产生的有功功率为正,模块电容电压上升;同理,电压高于该相直流电压平均值的模块,相内均压控制量与无功分量相位相反,产生负的有功功率,模块电容电压下降。

5 仿真分析

为了验证本文提出不平衡补偿能力计算方法的正确性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了 STATCOM 的仿真模型,模型的主电路按图 1 搭建,仿真参数如表 1 所示。

表 1 STATCOM 仿真电路参数

Tab. 1 Simulation parameters of system	
参数	数值
变压器变比	10kV/380V
级联数 n	3
电抗器 L 、 R	1mH/0.1Ω
链节直流电容/mF	7
开关频率/kHz	5
电容电压参考值/V	130

负载由 2 部分构成:①三相对称负载设置为 54kW、20kVar;②不平衡负载为 ab 相间跨接 30Ω 电阻。STATCOM 按负载检测得到的指令值输出。

每相链节直流侧最大输出 $V_d = 390V$,调制度 M 为 0.8。仿真过程中,在 0.3s 投入负序补偿环节。

第 1 组试验设置不平衡度为 18.6% (由负载电流正序无功分量及负序分量计算得到),仿真结果如图 8 ~ 图 12 所示。由图 8 可知,负载三相电流幅值有明显差异,负载电流中含有负序分量。为补偿负载电流负序分量,图 9 中补偿电流在 0.3s 时刻快速响应,跟踪负载电流对应值指令。图 10 中,0.3s 后,变压器高压侧电流负序分量基本为 0,三相电流平衡。图 11 为平衡负序电流在链节中产生功率所需的零序电压。在该零序电压作用下,由图 12 可知,各相链节直流侧电容电压均稳定在指令值附近。

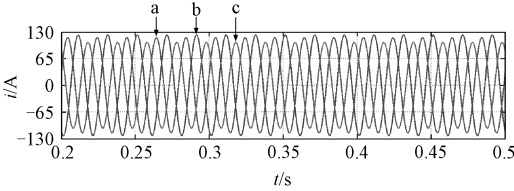


图 8 负载电流波形

Fig. 8 Waveforms of load current

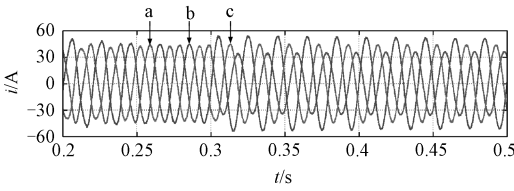


图 9 STATCOM 补偿电流波形

Fig. 9 Waveforms of compensation current

为形成对比,做第 2 组试验,在 0.3s 投入负序补偿环节的同时,去掉叠加的零序电压,负载不变,得到图 13 所示的三相链节电容电压。显而易见,该三相电容电压偏离指令值,控制系统无法正常工作。

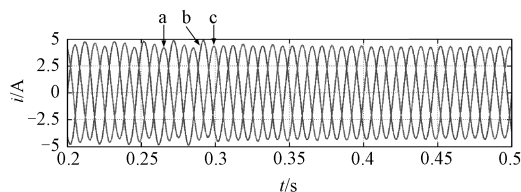


图 10 变压器高压侧电流波形

Fig. 10 Waveforms of high voltage side current of transformer

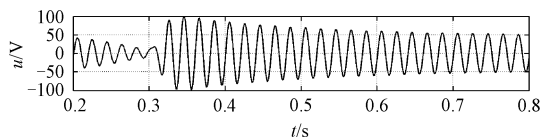


图 11 零序电压

Fig. 11 Zero sequence voltage

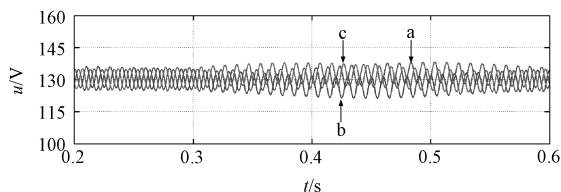


图 12 含零序电压时 STATCOM 链节电容电压

Fig. 12 DC voltage when injecting zero sequence voltage

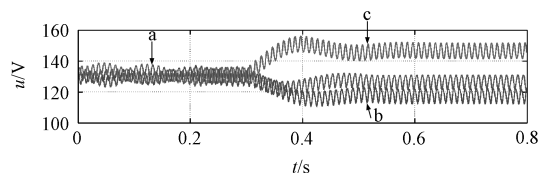


图 13 不含零序电压时 STATCOM 链节电容电压

Fig. 13 DC voltage without zero sequence voltage

为保证系统稳定工作,控制系统计算得到的零序电压需按式(20)限幅。第三组试验为加入零序电压,同时将不平衡度设置为 36%。叠加零序电压后,电容电压如图 14 所示,链节相间电容电压失衡,系统无法正常工作。

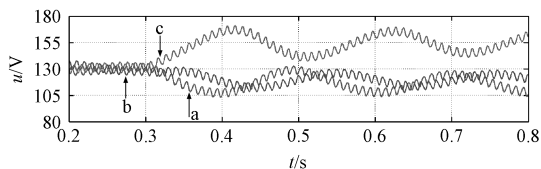


图 14 不平衡度过高时的三相电容电压

Fig. 14 DC voltage when unbalance degree is too high

6 结论

针对不平衡负荷校正问题,本文推导了星形级联 STATCOM 相间相内功率单元之间的功率流动关系,并提出了级联型补偿装置输出不平衡电流能力的计算方法,得出星形级联 STATCOM 不平衡补偿能力与调制度之间的数值关系。由 STATCOM 的控制目标,实时地调整控制器的指令值,避免电容电压失衡,保证系统良好的运行状态。仿真结果也验证了本文所述方法的有效性,该方法可为提高星形级联 STATCOM 的负序补偿提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] 曾令全,曾德俊,吴杰,等 (Zeng Lingquan, Zeng Dejun, Wu Jie, et al.). 用于有源滤波器谐波检测的一种新的自适应算法 (A novel adaptive algorithm applied in harmonic detection of active power filter) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (13): 40-44.
- [2] 王清亮,赵东强,付周兴,等 (Wang Qingliang, Zhao Dongqiang, Fu Zhouxing, et al.). 一种改进的无锁相环 FBD 谐波电流检测方法 (Improved FBD harmonic current detection method without PLL) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 19-24.
- [3] 李晶晶,赵争鸣,葛俊杰 (Li Jingjing, Zhao Zhengming, Ge Junjie). 有源电力滤波器两种电流检测方式研究 (Research on two kinds of current detection methods for APF) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (2): 52-56, 62.
- [4] Litran S P, Salmeron P. Analysis and design of different control strategies of hybrid active power filter based on the state model [J]. IET Power Electronics, 2012, 5 (8): 1341-1350.
- [5] 王兆安,杨君,刘进军,等 (Wang Zhao'an, Yang Jun, Liu Jinjun, et al.). 谐波抑制和无功功率补偿 (第二版) (Harmonic elimination and reactive power compensation (2nd Edition)) [M]. 北京:机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2005.
- [6] 孙蔚,伍小杰,戴鹏,等 (Sun Wei, Wu Xiaojie, Dai Peng, et al.). 基于 LCL 滤波器的电压源型 PWM 整流器控制策略综述 (An overview of current control strategy for three-phase voltage-source rectifier with LCL-filter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23 (1): 90-96.

- [7] 荣飞, 罗安, 汤赐, 等 (Rong Fei, Luo An, Tang Ci, et al.). STATCOM 输出滤波器结构设计及参数优化 (Structure design of output filter in STATCOM and its parameter optimization) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008, 23 (4): 137-142.
- [8] 王存平, 尹项根, 张哲, 等 (Wang Cunping, Yin Xianggen, Zhang Zhe, et al.). 配电网 STATCOM 输出 LCL 滤波器特性分析及参数设计 (Characteristic analysis and parameter design of output LCL filter in D-STATCOM) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2011, 26 (12): 99-105.
- [9] 许晓笛, 李子欣, 楚遵方, 等 (Xu Xiaodi, Li Zixin, Chu Zunfang, et al.). 三相四线三电平 APF 并联运行有源阻尼方法 (Active damping method of three-phase four-wire three-level multi-APF system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 12-19.
- [10] 潘汉广, 王军, 宋勇辉 (Pan Hanguang, Wang Jun, Song Yonghui). 多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析 (Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (4): 136-142.
- [11] 王松, 谈龙成, 李耀华, 等 (Wang Song, Tan Longcheng, Li Yaohua, et al.). 链式星形 STATCOM 补偿不平衡负载的控制策略 (A control strategy of star-connected cascade circuit STATCOM for unbalanced load compensation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2013, 33 (27): 20-27, 5.
- [12] 季振东, 孙毅超, 李东野, 等 (Ji Zhendong, Sun Yichao, Li Dongye, et al.). 星形和三角形连接的链式 H 桥 STATCOM 不平衡补偿分析 (Comparative analysis for unbalance compensation of cascaded H-bridge STATCOMs between star and delta configuration) [J]. 高压电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (7): 2435-2444.
- [13] 江燕兴, 潘逸崑, 窦伟 (Jiang Yanxing, Pan Yikun, Dou Wei). 一种用于光伏并网逆变器的高性能锁相环设计 (Design of high-performance phase locked loop used in grid-connected inverter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (7): 75-80.
- [14] 吴杰, 赵丽霞, 赵凡凡, 等 (Wu Jie, Zhao Lixia, Zhao Fanfan, et al.). 一种改善三相不平衡下逆变器并网系统电能质量的新方法 (A new method to improve power quality of inverter grid system under three-phase unbalance) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (11): 8-13.
- [15] 欧阳少迪, 刘进军 (Ouyang Shaodi, Liu Jinjun). 几种模块化多输出电力电子变压器拓扑的不平衡负载补偿能力比较 (Comparison of several modular multi-output power electronic transformer topologies on unbalanced load compensation capability) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (5): 11-20.

Unbalance load correction capability of cascaded STATCOM

DAI Jian¹, WEN Ming-hao², ZHANG You-qiang¹, ZHONG Jia-yong¹, LIU Zu-jian¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Corporation,

Chongqing 401123, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The interphase DC capacitance voltage will be imbalanced, when the star-connected cascade circuit static synchronous compensator (STATCOM) is used to correct the unbalanced load. The power of negative sequence current of STATCOM in each phase chain is derived, which makes it clear that the injection of negative sequence current produces unbalanced power between three phases. Zero sequence voltage injection method is introduced to balance the interphase DC capacitance voltage, and related control strategies and principles are researched. The capacity of unbalance load compensation is calculated from the limitation of the control system without over modulation. Finally, the MATLAB/Simulink simulation model is built to verify the control algorithm.

Key words: cascaded; STATCOM; DC voltage balance; zero sequence voltage injection; unbalanced load correction