

不平衡工况下链式 STATCOM 的运行极限分析

谭树龙, 杨 耕, 耿 华

(清华大学 自动化系, 北京 100084)

摘要: 在并网电压不平衡或补偿无功电流不平衡的工况下, 需采用控制策略以保证链式静止同步补偿器 (STATCOM) 各个链节单元的直流电压基本恒定。常用的方法是将三角形接线的 STATCOM 叠加零序电流或星形接线的 STATCOM 叠加零序电压。基于零序分量叠加的方法, 分析了在不平衡工况下保证链式 STATCOM 正常运行的条件。综合考虑并网电压不平衡与补偿无功电流不平衡的情况, 分析了并网电压不平衡度、补偿无功电流不平衡度与装置额定电流、额定电压之间的关系。据此定量给出了三角形接线与星形接线的 STATCOM 装置不平衡运行的极限。通过比较发现, 三角形接线的 STATCOM 更适用于补偿无功电流不平衡度较高的场合, 而星形接线的 STATCOM 更适用于并网电压不平衡度较高的场合。最后在 MATLAB/Simulink 环境中搭建了仿真系统, 仿真结果验证了上述分析的正确性和有效性。

关键词: 链式 STATCOM; 零序分量; 不平衡工况; 运行极限分析; 电压控制; 补偿

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.01.007

0 引言

静止同步补偿器 (STATCOM) 作为一种并联无功补偿装置被广泛应用于现代电力系统^[1]。在高压大功率的应用场合, 链式结构的 STATCOM 近年来逐渐成为研究的热点^[2-3]。它有三角形和星形 2 种主要结构。

链式 STATCOM (以下简称 STATCOM) 各个链节直流电压基本恒定是装置安全可靠运行的前提^[4]。在并网电压, 即公共连接点 (PCC) 的电压不平衡或补偿无功电流不平衡的工况下, STATCOM 的各相支路将持续输入或输出一定的有功功率^[5]。这会导致支路中的链节直流电压不稳定, 影响装置的可靠运行。针对这一问题, 目前有一些文献提出了不同的控制方法^[5-10]。这些方法虽然表现形式各有差异, 但是其最终效果都是在三角形 STATCOM 各相支路叠加零序电流、星形 STATCOM 各相支路叠加零序电压, 通过零序分量的作用实现 STATCOM 各相支路的有功功率为零。也有文献提出基于负序分量的控制方法^[11-12], 但适用场合受到较大的局限^[13]。因此本文只讨论基于零序分量叠加的控制方法。

基于零序分量叠加的控制方法增大了 STATCOM 各相支路流过的电流或支路承受的端电压^[10]。因此在装置额定电流或额定电压一定时, STATCOM 能够可靠运行的不平衡工况范围是有限的。截至目前, 绝大多数文献侧重于控制方法的研究。只有极少数的文献对星形 STATCOM 在补偿无功电流不平衡工况下的运行极限进行了量化分析^[10,13]。然而, 目前已

有的文献对三角形 STATCOM 受额定电流约束的运行极限鲜有报道; 对并网电压不平衡条件下的运行极限也未见详细的分析。本文将在已有文献的基础上进一步完善这部分工作。

本文首先分析在不平衡工况下影响 STATCOM 额定电流和额定电压的关键因素, 定量给出在三角形 STATCOM 额定电流与星形 STATCOM 额定电压一定的条件下, 装置能可靠运行的不平衡工况范围及其分析方法。在此基础上, 对三角形 STATCOM 和星形 STATCOM 在不平衡工况下的运行极限进行比较。最后通过仿真实验对运行极限分析的结果进行验证。

1 零序分量

三角形 STATCOM 的并网系统结构如图 1 所示。

所有不平衡工况对 STATCOM 而言表现为 2 个方面的特征: 并网电压不平衡与补偿无功电流不平衡。在此, 同时考虑这 2 个方面的不平衡特征, 以三角形 STATCOM 为例, 给出了统一的零序分量计算方法, 并进一步研究了影响零序分量的关键因素。

1.1 基于零序分量叠加的控制原理

在 STATCOM 并网电压 (即 PCC 电压) 不平衡的情况下, 三角形 STATCOM 各相支路的电压为:

$$\begin{cases} u_{ab} = U_p \sin(\omega t + \theta_{pu}) + U_n \sin(\omega t + \theta_{nu}) \\ u_{bc} = U_p \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_{pu}\right) + U_n \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_{nu}\right) \\ u_{ca} = U_p \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \theta_{pu}\right) + U_n \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \theta_{nu}\right) \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_p 、 U_n 分别为电压正、负序分量的幅值; θ_{pu} 、 θ_{nu} 分别为正、负序电压相位。

考虑叠加的零序电流分量, 三角形 STATCOM 各

收稿日期: 2014-05-08; 修回日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61104046, 61273045)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (61104046, 61273045)

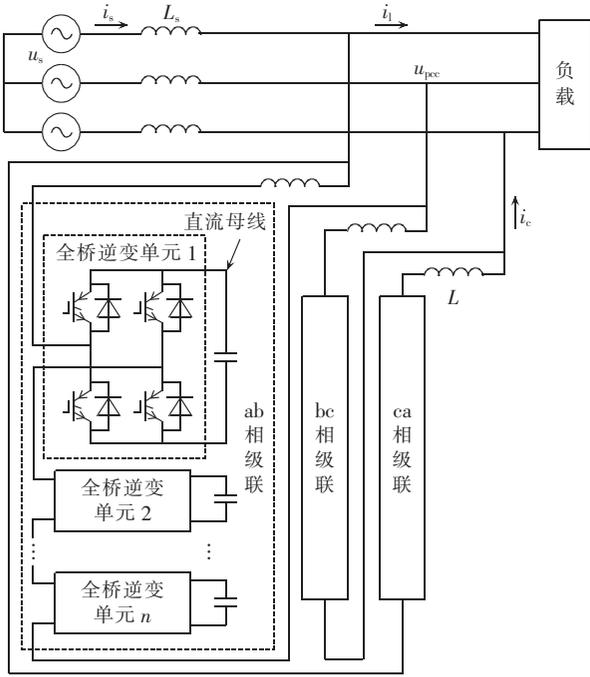


图 1 三角形 STATCOM 并网系统结构图

Fig.1 System configuration of delta-connected cascaded STATCOM

相支路流过的电流如式(2)所示:

$$\begin{cases} i_{ab} = I_p \sin(\omega t + \theta_{pi}) + I_n \sin(\omega t + \theta_{ni}) + \dots + I_0 \sin(\omega t + \theta_0) \\ i_{bc} = I_p \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \theta_{pi}\right) + I_n \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \theta_{ni}\right) + \dots + I_0 \sin(\omega t + \theta_0) \\ i_{ca} = I_p \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} + \theta_{pi}\right) + I_n \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3} + \theta_{ni}\right) + \dots + I_0 \sin(\omega t + \theta_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, I_p, I_n 分别为补偿无功电流正、负序分量的幅值; θ_{pi}, θ_{ni} 分别为正、负序电流相位。

根据式(1)和式(2)可导出各相支路的有功功率:

$$2P_{ab} = U_p I_p \cos(\theta_{pu} - \theta_{pi}) + U_p I_n \cos(\theta_{pu} - \theta_{ni}) + \dots + U_p I_0 \cos(\theta_{pu} - \theta_0) + U_n I_p \cos(\theta_{nu} - \theta_{pi}) + \dots + U_n I_n \cos(\theta_{nu} - \theta_{ni}) + U_n I_0 \cos(\theta_{nu} - \theta_0) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} 2P_{bc} = & U_p I_p \cos(\theta_{pu} - \theta_{pi}) + U_p I_n \cos\left(\theta_{pu} - \theta_{ni} - \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & \dots + U_p I_0 \cos\left(\theta_{pu} - \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & U_n I_p \cos\left(\theta_{nu} - \theta_{pi} + \frac{4\pi}{3}\right) + \dots + U_n I_n \cos(\theta_{nu} - \theta_{ni}) + \\ & U_n I_0 \cos\left(\theta_{nu} - \theta_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} 2P_{ca} = & U_p I_p \cos(\theta_{pu} - \theta_{pi}) + U_p I_n \cos\left(\theta_{pu} - \theta_{ni} - \frac{2\pi}{3}\right) + \\ & \dots + U_p I_0 \cos\left(\theta_{pu} - \theta_0 - \frac{4\pi}{3}\right) + \\ & U_n I_p \cos\left(\theta_{nu} - \theta_{pi} + \frac{2\pi}{3}\right) + \dots + U_n I_n \cos(\theta_{nu} - \theta_{ni}) + \\ & U_n I_0 \cos\left(\theta_{nu} - \theta_0 + \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

三角形 STATCOM 的三相支路有功功率总和为:

$$P = \frac{3}{2} U_p I_p \cos(\theta_{pu} - \theta_{pi}) + \frac{3}{2} U_n I_n \cos(\theta_{nu} - \theta_{ni}) \quad (6)$$

作为并联无功补偿设备, STATCOM 补偿的正、负序电流均为无功电流, 即:

$$\theta_{pi} = \theta_{pu} \pm \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

$$\theta_{ni} = \theta_{nu} \pm \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

因此三相支路总的有功功率为零, 即有:

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = 0 \quad (9)$$

为了维持各支路中链节的直流电压基本恒定, 需要在三角形 STATCOM 中叠加零序电流, 以保证各相支路输入或输出的有功功率为零。由于已有式(9)的约束, 叠加的零序电流只需满足式(10)即可:

$$\begin{cases} P_{ab} = 0 \\ P_{bc} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(3)、式(4), 并经过一系列推导得:

$$\begin{cases} v_1 I_0 \cos \theta_0 + v_2 I_0 \sin \theta_0 = -p_1 \\ v_3 I_0 \cos \theta_0 + v_4 I_0 \sin \theta_0 = -p_2 \end{cases} \quad (11)$$

$$v_1 = U_p \cos \theta_{pu} + U_n \cos \theta_{nu}, \quad v_2 = U_p \sin \theta_{pu} + U_n \sin \theta_{nu}$$

$$v_3 = U_p \cos\left(\theta_{pu} - \frac{2\pi}{3}\right) + U_n \cos\left(\theta_{nu} + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$v_4 = U_p \sin\left(\theta_{pu} - \frac{2\pi}{3}\right) + U_n \sin\left(\theta_{nu} + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$p_1 = U_p I_n \cos(\theta_{pu} - \theta_{ni}) + U_n I_p \cos(\theta_{nu} - \theta_{pi})$$

$$p_2 = U_p I_n \cos\left(\theta_{pu} - \theta_{ni} - \frac{4\pi}{3}\right) + U_n I_p \cos\left(\theta_{nu} - \theta_{pi} + \frac{4\pi}{3}\right)$$

方程组(11)的解可表示为:

$$\tan \theta_0 = \frac{v_1 p_2 - v_3 p_1}{v_4 p_1 - v_2 p_2} \quad (12)$$

$$\tilde{I}_0 = \frac{v_1 p_2 - v_3 p_1}{v_3 v_2 - v_1 v_4} \frac{1}{\sin \theta_0}, \quad I_0 = |\tilde{I}_0| \quad (13)$$

若解出 \tilde{I}_0 为负值, 则应将零序电流相位 θ_0 校正为:

$$\theta_0^* = \pi + \theta_0 \quad (14)$$

如图 2 所示, 在一定的并网电压不平衡度与补偿

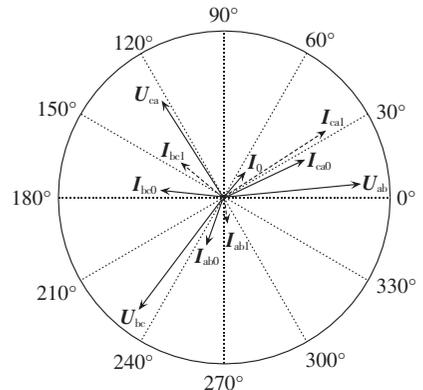


图 2 零序电流的作用机理

Fig.2 Functional mechanism of zero-sequence current

电流不平衡度条件下,三角形 STATCOM 各相支路的电流原本与相应的端电压并不垂直,例如相量 I_{bc0} 与 U_{bc} 之间的夹角不为 90° , bc 支路存在有功功率变化。叠加适当的零序电流 I_0 之后,各相支路的电流垂直于相应的端电压。对于星形 STATCOM,可类似推导其在不平衡工况下所需叠加的零序电压表达式。基于零序电压叠加的控制方法,可实现星形 STATCOM 在不平衡工况下的可靠运行。

1.2 零序分量的影响因素

由式(12)、(13)可知,三角形 STATCOM 在不平衡工况下所需叠加的零序电流受 $U_p, U_n, I_p, I_n, \theta_{pu}, \theta_{nu}, \theta_{pi}, \theta_{ni}$ 等因素影响。为便于对零序分量进行定量研究,必须进一步分析其中的关键影响因素。在实际控制中通常取正序电压相位为参考,即:

$$\theta_{pu}=0 \quad (15)$$

将式(15)代入式(12)与式(13),经过一系列推导得:

$$\tan \theta_0 = \frac{D_I \sin \alpha_1 + D_U \sin \alpha_2 + D_U D_I \sin \alpha_3 + D_U^2 \sin \alpha_4}{-D_I \cos \alpha_1 - D_U \cos \alpha_2 + D_U D_I \cos \alpha_3 + D_U^2 \cos \alpha_4} \quad (16)$$

$$\tilde{I}_0 = I_p \times \left| \frac{D_I \sin \alpha_1 + D_U \sin \alpha_2 + D_U D_I \sin \alpha_3 + D_U^2 \sin \alpha_4}{1 - D_U^2} \frac{1}{\sin \theta_0} \right| \quad (17)$$

$$D_U = U_n / U_p, \quad D_I = I_n / I_p$$

$$\alpha_1 = \theta_{nu} + (\theta_{ni} - \theta_{nu}), \quad \alpha_2 = \theta_{nu} - (\theta_{pi} - \theta_{pu})$$

$$\alpha_3 = 2\theta_{nu} + (\theta_{ni} - \theta_{nu}), \quad \alpha_4 = 2\theta_{nu} - (\theta_{pi} - \theta_{pu})$$

其中, D_U 与 D_I 分别为电压不平衡度与电流不平衡度。

STATCOM 作为并联无功补偿设备,补偿的正、负序电流均为无功电流。因此有:

$$\theta_{pi} - \theta_{pu} = \pm \pi / 2, \quad \theta_{ni} - \theta_{nu} = \pm \pi / 2 \quad (18)$$

将式(18)代入式(16)、(17),发现正、负序电流的容性与感性特征对零序电流具有重要影响。通过改进电流不平衡度的定义可以简化表达这种影响。为此,改进电流不平衡度的定义为:

$$D_I^* \triangleq \hat{I}_n / \hat{I}_p \quad (19)$$

$$\hat{I}_p \triangleq \begin{cases} I_p & \theta_{pi} - \theta_{pu} = -\pi / 2 \\ -I_p & \theta_{pi} - \theta_{pu} = \pi / 2 \end{cases}$$

$$\hat{I}_n \triangleq \begin{cases} I_n & \theta_{ni} - \theta_{nu} = -\pi / 2 \\ -I_n & \theta_{ni} - \theta_{nu} = \pi / 2 \end{cases}$$

将式(19)代入式(16)、(17)可得:

$$\tan \theta_0 = \frac{D_I^* \cos \theta_{nu} - D_U \cos \theta_{nu} + D_U D_I^* \cos 2\theta_{nu} - D_U^2 \cos 2\theta_{nu}}{D_I^* \sin \theta_{nu} - D_U \sin \theta_{nu} - D_U D_I^* \sin 2\theta_{nu} + D_U^2 \sin 2\theta_{nu}} \quad (20)$$

$$\tilde{I}_0 = I_p \times \left| \frac{D_I^* \cos \theta_{nu} - D_U \cos \theta_{nu} + D_U D_I^* \cos 2\theta_{nu} - D_U^2 \cos 2\theta_{nu}}{(1 - D_U^2) \sin \theta_0} \right| \quad (21)$$

通过式(20)、(21)可以发现,三角形 STATCOM 在不平衡工况下所需叠加的零序电流仅由 4 个因素决定。除正序无功电流的幅值 I_p 之外,其他 3 个影

响因素分别为:并网电压的不平衡度 D_U 、补偿无功电流的不平衡度 D_I^* 以及并网电压中负序电压分量与正序电压分量的相位差 θ_{nu} (因取定 $\theta_{pu}=0$ 而将二者相位差 $\theta_{nu}-\theta_{pu}$ 简化表达为 θ_{nu})。零序电流相量满足式(22):

$$I_0 = I_p \cdot f(D_U, D_I^*, \theta_{nu}) \quad (22)$$

经过分析,发现对于星形 STATCOM 在不平衡工况下所需叠加的零序电压也有类似的结论。

2 不平衡工况范围

以三角形 STATCOM 为例,叠加零序电流以后,各支路的电流如式(23)所示:

$$I_{ab} = I_p (1 \angle \theta_{pi} + D_I \angle \theta_{ni}) + I_0 \angle \theta_0$$

$$I_{bc} = I_p \left[1 \angle \left(\theta_{pi} - \frac{2\pi}{3} \right) + D_I \angle \left(\theta_{ni} + \frac{2\pi}{3} \right) \right] + I_0 \angle \theta_0 \quad (23)$$

$$I_{ca} = I_p \left[1 \angle \left(\theta_{pi} - \frac{4\pi}{3} \right) + D_I \angle \left(\theta_{ni} + \frac{4\pi}{3} \right) \right] + I_0 \angle \theta_0$$

三角形 STATCOM 的额定电流应该取三者的最大值:

$$I_{\max} = \max \{ |I_{ab}|, |I_{bc}|, |I_{ca}| \} \quad (24)$$

将式(15)、(18)代入式(23),再结合式(22)所示的函数关系,可推导 STATCOM 额定电流大小与不平衡工况之间的函数关系,如式(25)所示:

$$I_{\max} / I_p = F(D_U, D_I^*, \theta_{nu}) \quad (25)$$

其中, D_U, D_I^*, θ_{nu} 这 3 个参数反映了 STATCOM 的不平衡工况特征; I_{\max} / I_p 反映了在此不平衡工况下,三角形 STATCOM 为保证可靠运行所需要的额定电流大小。通过分析发现,当 D_U 与 D_I^* 2 个参数取定之后, I_{\max} / I_p 随 θ_{nu} 的变化呈现周期性变化规律,如图 3 中实线所示。取其峰值作为此时的 I_{\max} / I_p ,可进一步将式(25)所示的函数关系简化表达为:

$$I_{\max} / I_p = \tilde{F}(D_U, D_I^*) \quad (26)$$

对于星形 STATCOM 而言,可类似地推导其额定电压大小与不平衡工况之间的函数关系:

$$U_{\max} / U_p = \tilde{G}(D_U, D_I^*) \quad (27)$$

其中, U_{\max} / U_p 反映了在 D_U, D_I^* 所决定的不平衡工况下,星形 STATCOM 为保证可靠运行所需要的额定电压大小。

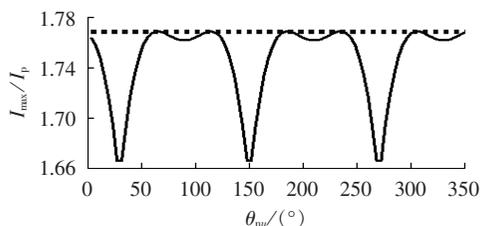


图 3 I_{\max} / I_p 随 θ_{nu} 周期性变化的曲线
Fig.3 Periodic variation of I_{\max} / I_p along with θ_{nu}

根据式(26)所示的函数关系,通过数值分析方法可得到三角形 STATCOM 的额定电流水平 I_{\max}/I_p 与并网电压不平衡度 D_U 以及补偿无功电流不平衡度 D_i^* 之间的量化关系,如图 4 所示。图 5 则表示了星形 STATCOM 的额定电压水平 U_{\max}/U_p 与不平衡工况之间的定量关系。

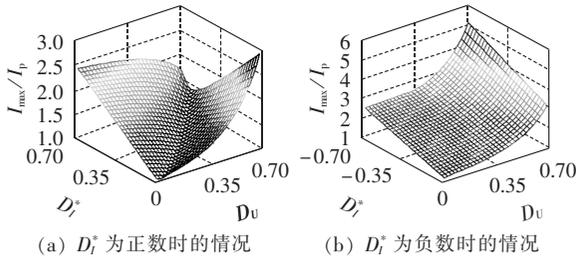


图 4 三角形 STATCOM 额定电流的变化情况
Fig.4 Variation of rated current of delta-connected STATCOM

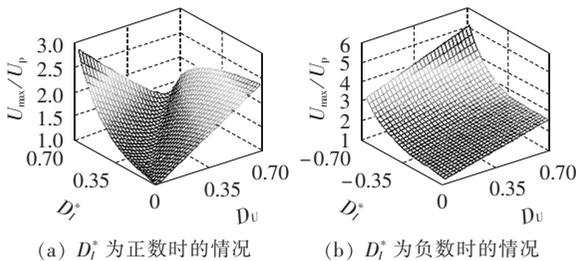


图 5 星形 STATCOM 额定电压的变化情况
Fig.5 Variation of rated voltage of star-connected STATCOM

观察图 4 可以发现,在三角形 STATCOM 的额定电流水平 I_{\max}/I_p 一定的情况下,沿 I_{\max}/I_p 值作一个平行于 D_U 轴与 D_i^* 轴的平面,只有位于该平面以下的不平衡工况范围是装置能够可靠运行的区域。从控制的角度而言,当装置额定电流与并网电压不平衡度一定的情况下,为了保障装置安全可靠运行,需要根据图 4 的分析结果,控制 STATCOM 补偿无功电流的不平衡度在一定的范围内。

对比图 4 和图 5 可以发现,为保证装置在不平衡工况下可靠运行,三角形 STATCOM 所需的额定电流与星形 STATCOM 所需的额定电压同时受到 D_U 与 D_i^* 的影响。2 种 STATCOM 受 D_U 与 D_i^* 的影响是对偶等效的,在 D_U 较大的不平衡工况下,三角形 STATCOM 所需的额定电流显著提高;在 D_i^* 较大的不平衡工况下,星形 STATCOM 所需的额定电压显著提高。因此,从经济性的角度考虑,三角形 STATCOM 更适用于补偿无功电流不平衡度 D_i^* 较高的场合;星形 STATCOM 更适用于并网电压不平衡度 D_U 较高的场合。所以有必要根据应用场合的不同适当选择三角形 STATCOM 或星形 STATCOM。

3 仿真验证

本节以 ± 50 Mvar/10 kV 的链式 STATCOM 为例,

通过 MATLAB 对上述的分析结果进行验证。需要说明的是,由于本文旨在从理论上分析链式 STATCOM 在不平衡工况下的可靠运行范围,而并不是提出一种实际应用的新型控制方法,因此仅通过仿真验证理论分析的正确性。仿真中涉及三角形与星形 2 种 STATCOM,参数列于表 1。需要说明的是,虽然实际中 STATCOM 向电网补偿无功电流会使并网电压(PCC 电压)发生变化,但是由于本文的核心是说明 STATCOM 在一定的并网电压不平衡和补偿无功电流不平衡的情况下,三角形 STATCOM 的额定电流与星形 STATCOM 的额定电压大小,因此为了便于说明问题,在仿真中设定 PCC 处电压恒定。此外,本仿真的目的是验证理论分析的结果,所以忽略了 PWM 等环节。

表 1 STATCOM 系统仿真参数
Table 1 Simulation parameters of STATCOM system

参数	数值
电网频率/Hz	50
额定容量/Mvar	± 50
电网线电压有效值/kV	10
额定电流有效值/A	2890
并网电感/mH	0.95
模块直流母线电压/V	3000
直流母线电容/ μ F	9000
星形拓扑级联单元数	6
三角形拓扑级联单元数	8
级联模块额定电压/V	4500
级联模块额定电流/A	4000

3.1 平衡电压条件下的 STATCOM 运行

STATCOM 的并网电压平衡,即 $D_U = 0$ 。此时设置电流不平衡度 $D_i^* = 0.4$,以三角形 STATCOM 为例进行仿真实验。根据图 3 所示的分析方法可知在这种不平衡度条件下, $\theta_{nu} = 60^\circ$ 时 I_{\max}/I_p 最大。本仿真以这种最严峻的情况为例,设定 $\theta_{nu} = 60^\circ$ 。根据图 4 的分析结果可知,为保障装置在这种不平衡工况下可靠运行,其额定电流幅值至少应该设计为 $1.8 I_p$,即 1.04 p.u.。仿真结果如图 6 所示。图 6(a)中 I_p, I_n 分别为 STATCOM 向 PCC 补偿电流的正、负序分量标么值,其中负序分量占正序分量的 40%,对应的电流波形(标么值)如图 6(b)所示。图 6(c)表示 STATCOM 并网电压的正、负序分量标么值,对应的电压波形(标么值)如图 6(d)所示。图 6(e)表示三角形 STATCOM 内各相支路上流过的电流标么值,其中 i_{ca} 幅值较大,达到 1.05 p.u.,与理论分析的结果 1.04 p.u. 基本吻合。STATCOM 各个支路中除了正、负序电流之外,额外叠加了零序电流 i_0 ,如图 6(f)所示(标么值)。零序电流叠加使得三角形 STATCOM 各个支路流过的电流与相应的端电压相位垂直,见图 6(d)与图 6(e)。最终的目的是保持各个级联模块的直流母线电压能够

维持在 3 kV 左右,见图 6(g)。为方便观察波形的细节,对图 6 的部分波形作了时间轴放大处理。

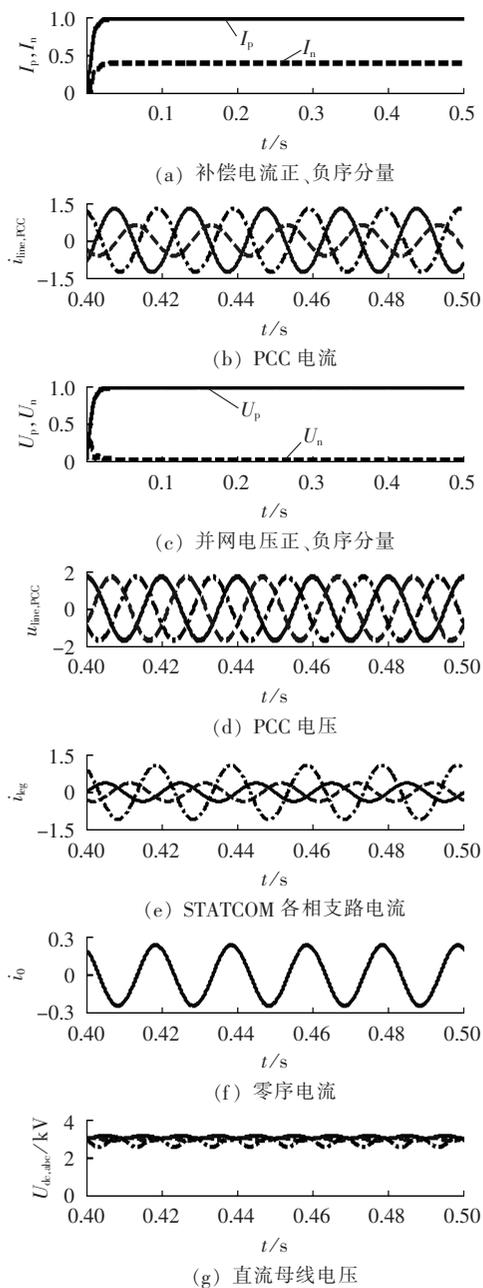


图 6 三角形拓扑在 $D_U=0, D_i^*=0.4$ 下的仿真结果
Fig.6 Simulative results of delta structure, when $D_U=0, D_i^*=0.4$

3.2 不平衡电压条件下的 STATCOM 运行

本仿真设定三角形 STATCOM 的并网电压不平衡度 $D_U=0.3$, STATCOM 向电网补偿 1 p.u. 的感性正序无功电流和 0.4 p.u. 的容性负序无功电流,即 $D_i^*=-0.4$ 。根据图 4 的分析结果,三角形 STATCOM 的额定电流应设计为 $1.94 I_p$,即 1.12 p.u.。仿真结果如图 7 所示($\theta_{nu}=40^\circ$)。图 7(e)所示三角形 STATCOM 各相支路上流过的电流波形中, i_{ca} 幅值较大,达到 1.14 p.u.,与额定电流幅值的理论分析结果 $1.12 I_p$ 基本

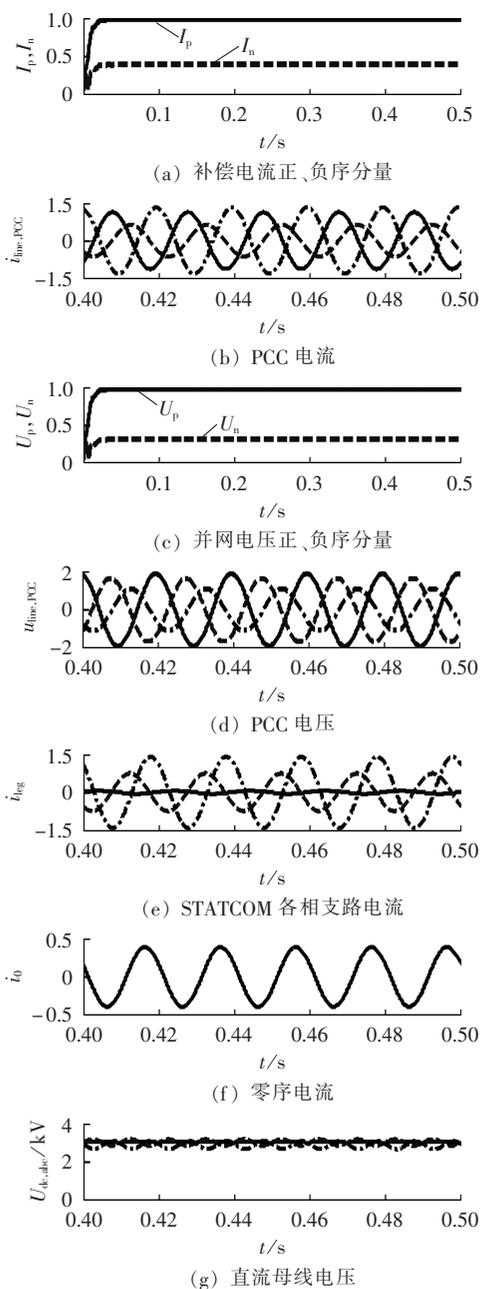


图 7 三角形拓扑在 $D_U=0.3, D_i^*=-0.4$ 下的仿真结果
Fig.7 Simulative results of delta structure, when $D_U=0.3, D_i^*=-0.4$

吻合。

为说明星形 STATCOM 与三角形 STATCOM 的对偶等效特征,对 ± 50 Mvar/10 kV 的星形 STATCOM 系统进行了仿真。与三角形 STATCOM 的不平衡工况对偶,设定 $D_U=0.4, D_i^*=-0.3$ 。理论上星形 STATCOM 所需的额定电压幅值应设计为 $1.94 U_p$ 。仿真结果如图 8 所示($\theta_{nu}=18^\circ$)。图 8(a)所示 STATCOM 补偿无功电流的正、负序分量中,负序分量为 0.3 p.u.,图 8(c)所示 STATCOM 并网电压的正、负序分量中,负序分量为 0.4 p.u.。图 8(e)所示星形 STATCOM 各相支路的端电压波形中, u_{ab} 幅值较大,达到 1.96 p.u.,与理论分析的额定电压幅值大小吻合。

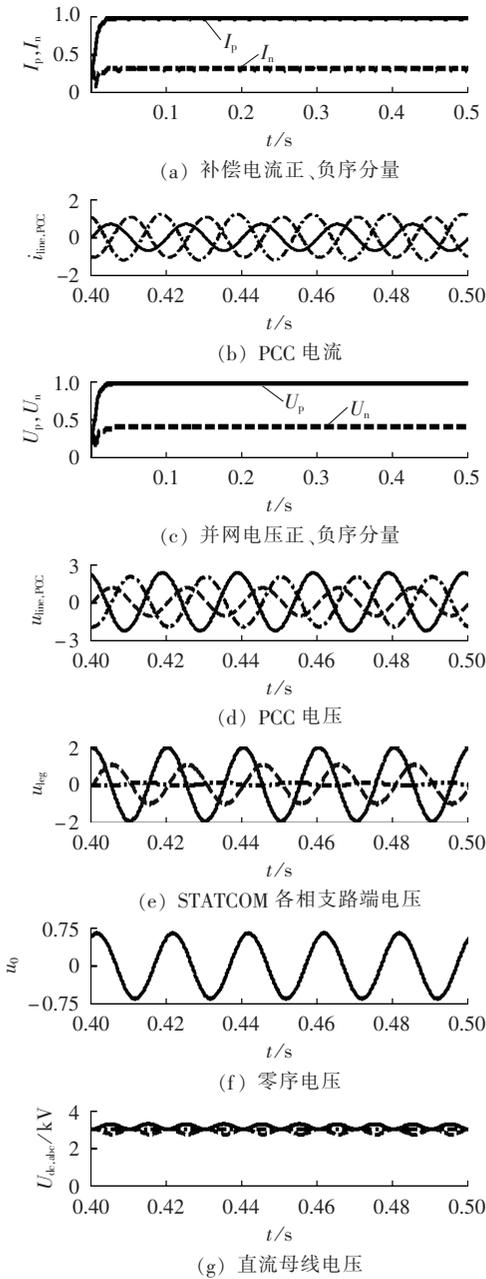


图 8 星形拓扑在 $D_U=0.4, D_V^*=-0.3$ 下的仿真结果
 Fig.8 Simulative results of star structure,
 when $D_U=0.4, D_V^*=-0.3$

4 结论

本文综合考虑并网电压不平衡与补偿无功电流不平衡的情况,通过对并联型链式 STATCOM 额定电流、电压的影响因素分析,定量给出了三角形接线 STATCOM 与星形接线 STATCOM 装置的不平衡运行能力和范围。分析可知,从优化角度出发,可根据本文给出的极限控制 STATCOM 输出的无功补偿电流;从经济性出发,三角形 STATCOM 更适用于补偿无功电流不平衡度较高的场合,而星形 STATCOM 更适用于并网电压不平衡度较高的场合。本文的分析方法和分析结果可应用于链式 STATCOM 的系统设

计和控制。

参考文献:

- [1] SINGH B, SAHA R, CHANDRA A, et al. Static synchronous compensators (STATCOM): a review [J]. IET Power Electronics, 2009, 2(4): 297-324.
- [2] 杨振宇, 许胜, 许杏桃. 高压大容量 D-STATCOM 主电路的比较与分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 50-55.
 YANG Zhenyu, XU Sheng, XU Xingtao. Comparison and analysis of high-voltage large-capacity DSTATCOM main circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 50-55.
- [3] 黄伟雄, 刘锦宁, 王永源, 等. 35 kV ±200 Mvar STATCOM 系统总体设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(10): 136-142.
 HUANG Weixiong, LIU Jinning, WANG Yongyuan, et al. Overall design of 35 kV ±200 Mvar STATCOM system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(10): 136-142.
- [4] 耿俊成, 刘文华, 袁志昌. 链式 STATCOM 电容电压不平衡现象研究(一)仿真和试验[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 53-57.
 GENG Juncheng, LIU Wenhua, YUAN Zhichang. Research on the voltage unbalance of DC capacitors of cascade STATCOM part one simulations and experiments[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 53-57.
- [5] PENG Fangzheng, WANG Jin. A universal STATCOM with delta-connected cascade multilevel inverter[C]//Power Electronics Specialists Conference. Piscataway, USA: [s.n.], 2004: 3529-3533.
- [6] BETZ R E, SUMMERS T. Using a cascaded H-bridge STATCOM for rebalancing unbalanced voltages[C]//International Conference on Power Electronics. Daegu, Korea: [s.n.], 2007: 1219-1224.
- [7] HAGIWARA M, MAEDA R, AKAGI H. Negative-sequence reactive-power control by a PWM STATCOM based on a modular multi-level cascade converter(MMCC-SDBC)[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 720-729.
- [8] 刘钊, 刘邦银, 段善旭, 等. 系统电压不平衡下链式静止同步补偿器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(9): 1-7.
 LIU Zhao, LIU Bangyin, DUAN Shanxu, et al. Research on cascade multilevel STATCOM under unbalanced system voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 1-7.
- [9] 杨昆, 陈磊, 陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 36-41.
 YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 36-41.
- [10] SONG Qiang, LIU Wenhua. Control of a cascade STATCOM with star configuration under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(1): 45-58.
- [11] 袁志昌. 链式静止同步补偿器的控制与保护策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
 YUAN Zhichang. The control and protection strategy research on the cascade static synchronous compensator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [12] HATANNO N, ISE T. Control scheme of cascaded H-bridge STATCOM using zero-sequence voltage and negative-sequence current[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 543-550.
- [13] 富力. 级联 H-桥多电平 STATCOM 关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.

(下转第 78 页 continued on page 78)

Efficient variant mode control of LLC resonant converter

PAN Haiyan^{1,2}, HE Chao¹, JIANG Youming², CHEN Guozhu¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China)

Abstract: A strategy of variant mode control is proposed for LLC resonant converter, which adopts the FM (Frequency Modulation) control, when the rated voltage is inputted, to obtain the maximum performance efficiency; the asymmetric PWM (Pulse Width Modulation) control, when the input voltage is low, to operate in flyback mode for the maximum voltage gain; and the symmetric PWM control, when the input voltage is high or load is light, to realize the ZVS (Zero Voltage Switching) of power switch and the ZCS (Zero Current Switching) of rectifier diode for switching loss reduction covering whole load range. Its operating modes and characteristics are analyzed and the block diagram of control scheme is given. Experimental results show the converter obtains higher performance efficiency and higher power density, verifying the feasibility of the proposed strategy.

Key words: variant mode control; pulse width modulation; frequency modulation; zero voltage switching; zero current switching; LLC resonant converter; electric converters

(上接第 49 页 continued from page 49)

GONG Li. Key technology research of H-bridge based cascade multilevel STATCOM[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

作者简介:

谭树龙(1990—),男,湖南衡阳人,博士研究生,研究方向为电力电子系统和新能源发电技术(E-mail: TanSL_mail@



谭树龙

foxmail.com);

杨耕(1957—),男,四川青川人,教授,博士,主要研究方向为运动控制系统、电力电子系统和新能源发电技术;

耿华(1981—),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要研究方向为新能源发电技术和电力电子技术。

Analysis of operating limit for cascaded STATCOM in unbalanced condition

TAN Shulong, YANG Geng, GENG Hua

(Automation Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In the operating conditions of unbalanced grid voltage or unbalanced compensating reactive current, it is necessary to maintain the DC-link voltage of cascaded STATCOM by additional control. The widely-used method is to superpose the zero-sequence current to the delta-connected STATCOM or the zero-sequence voltage to the star-connected STATCOM, based on which, the requirements for maintaining the normal operation of cascaded STATCOM in unbalanced operating conditions are analyzed. The relationship between the unbalance factor of grid voltage or compensating reactive current and the rated current or voltage of device is analyzed. Accordingly, the operational limits of delta-connected and star-connected STATCOMs are given quantitatively. Comparison shows that, the delta-connected STATCOM is more suitable for the operating conditions with higher unbalance factor of compensating reactive current while the star-connected STATCOM for those with higher unbalance factor of grid voltage. The results of simulation in MATLAB/Simulink environment demonstrate the correctness and effectiveness of analysis.

Key words: cascaded STATCOM; zero-sequence component; unbalanced operating condition; operating limit analysis; voltage control; compensation