

相角前馈改善 STATCOM 直流电压控制的分析与仿真

刘宇轩^{1,2}, 戴朝波², 赵国亮², 李彬¹, 孙毅¹, 陆振纲²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 先进输电技术全国重点实验室
(国网智能电网研究院有限公司), 北京 102209)

摘要: STATCOM 是应用非常广泛且被长期研究的灵活交流输电装置, STATCOM 性能的提升和成本的降低一直是研究的重点和热点。在分析基于派克坐标变换的三相锁相环鉴相器输出特性的基础上, 提出了具有相角瞬时跟踪特性的三相锁相环, 改进 STATCOM 直流电压的暂态性能, 以期通过减少直流电容容值、增加直流电压来提升直流电容或 IGBT 等部件的利用率。在 PSCAD 软件中分别搭建了三相桥 STATCOM 和链式级联 STATCOM 的等值仿真系统。系统地仿真并分析了无功电流指令的跃变, 电网电压幅值、相角和频率的跃变等小扰动工况和电网发生短路故障的大扰动工况。仿真分析对比的结果表明, 如 STATCOM 公共连接点电压相角在扰动过程中有显著变化, 则新方法的直流电压控制特性显著优于传统方法, 无功功率响应速度也略有提升, 且能明显降低直流电容的电气应力。
关键词: STATCOM; 直流电压控制; 锁相环; 瞬时响应

Analysis and Simulation of Improvement of DC Voltage Control of STATCOM Through Phase Angle Feed-forward

LIU Yuxuan^{1,2}, DAI Chaobo², ZHAO Guoliang², LI Bin¹, SUN Yi¹, LU Zhengang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing, 102209, China)

Abstract: STATCOM is a flexible AC transmission device which has been widely used and studied for a long time. The performance improvement and cost reduction of the STACOM are always the focus in the research. Based on the analysis of the output characteristic of the phase detector of the typical Park transformation of three-phase phase locked loop, a novel three-phase PLL with instantaneous response is proposed to improve the transient performance of the STATCOM DC voltage and enhance the utilization rate of DC capacitor or IGBT by way of reducing the DC capacitance or increasing the DC voltage. The equivalent simulation system of three-phase bridge STATCOM and chain cascaded STATCOM are set up respectively in PSCAD software. Such small disturbances as step of reactive current instruction, amplitude of grid voltage, step of phase angle and frequency and such big disturbance as short circuit fault of grid are systematically simulated and analyzed. The simulation analysis comparison result shows that in case of remarkable change of voltage phase angle of common connection point of the SATCOM during the disturbance, the DC voltage control characteristic of the new method is more superior to the traditional method, the response speed of the reactive power increase slightly and the electrical stress of the DC capacitor can be reduced significantly.

Keywords: STATCOM; control of DC voltage; phase locked loop; instantaneous response

0 引言

静止同步补偿器(static synchronous compensator,

STATCOM)是被广泛应用^[1-4]和长期研究^[5-7]的灵活交流输电装置,其性能的提升和成本的降低一直是研究的重点和热点。STATCOM 的控制目标主要有 2 个,

收稿日期:2023-05-05

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5500-202158475A-0-5-ZN)。

1) 维持 STATCOM 直流电压在允许的范围内^[8-10];
2) 根据电网的运行工况,按照预先设定的控制逻辑,快速、实时、准确地向电网注入相应的电流,即提供动态无功补偿。通常,STATCOM 装置级控制可分为 5 部分,即同步、直流电压控制、交流电压控制、交流电流控制和 PWM 调制。

电网同步方法可分为基于电压的同步和基于功率的同步^[11-13]两大类。基于电压的同步在 STATCOM 等灵活交流输电装置中的应用占主导地位。锁相同步控制通常采用三相软件锁相环,输入量通常为公共连接点三相电压,通过三相软件锁相环找到相应的频率和相角,作为电流控制和电压控制的控制基准^[14]。近些年,对基于电压的同步研究大都聚焦于暂态同步稳定性及其提升措施^[15-17]。对同步与 STATCOM 的直流电压控制、交流电流控制之间的研究略少,简要阐述如下:

文献[18]提出弱电网下考虑锁相环影响的系统相角补偿控制方法,通过公共耦合点电压前馈输出来修正 dq 轴的指令电压,以此改变并网换流器的输出导纳。然而该方法没有应用锁相环的相角差,解决的是因锁相环带宽较大引起的不稳定问题。文献[19]用直流电压 PI 控制输出来估计相角修正量,并用该修正量来修正锁相环估计的相角,以此来应对电网不对称故障下 STATCOM 直流过电压闭锁问题。然而,用直流电压 PI 控制来估计相角修正量至少附加了直流电压变化的动态过程,严重时会导致稳定问题。文献[20]采用前馈与补偿的思路,提出了锁相环和直流电压环的对称控制方法,以此来减小锁相环和直流电压环的不对称影响,提高在弱电网条件下的稳定性。然而,该控制方法略显复杂,同时没有构建锁相环和直流电压环之间的联系。

通过适当的控制使 STATCOM 直流电压在扰动过程中具有较小的电压波动、能较快地恢复,则可以减少直流电容容值或增加直流电压值,以提高直流电容或 IGBT 等部件的利用率,进而降低成本。因此,如何提升 STATCOM 直流电压的暂态特性具有深入研究的必要性,简单且有效的控制方法肯定是具有工程实践的应用价值。

本文对应用非常广泛的基于同步坐标系的三相锁相环进行修改,得到公共耦合点电压瞬时相角的估计值,并用于 STATCOM 直流电压和输出电流的控制,即通过锁相环的改进来提升直流电压和输出电流的控制性能。在 PSCAD 中分别搭建了三相桥 STATCOM 和链式级联 STATCOM 的等值仿真系统,电网幅值跃变等小扰动和电网故障等大扰动的

工况,仿真结果表明,新控制的直流电压控制特性要显著优于传统控制。

1 具有瞬时跟踪特性的三相锁相环

1.1 基于同步坐标系的锁相环

锁相环通常包括鉴相器、环路滤波器和振荡器。图 1 给出了应用较为广泛的基于同步坐标系的三相锁相环(synchronous reference frame phase locked loop, SRF-PLL)。从公共耦合点(point of common coupling, PCC)的三相电压中提取三相正序基波分量,即图 1 中的 U_{abc} ,再利用派克(park)变换将 abc 坐标下的三相电压转换为 dq 坐标下的两相电压,即 U_d 和 U_q 。应用 U_d 和 U_q 可计算出三相的电压幅值,即图 1 中的 U ,并用于 U_q 的归一化。归一化后的 U_{qn} 通过环路滤波器,即图 1 的比例积分控制环节,得到估计的角频率附加量 $\Delta\omega$ 。用估计的角频率附加量 $\Delta\omega$ 来修正基准角频率 ω_0 ,得到估计的电网角频率 ω 。估计的电网角频率 ω 通过振荡器得到估计的相角信号 θ 。 K_p 、 T_i 为锁相环比例积分控制环节中的比例系数与积分时间常数。对于标称频率为 50 Hz 的电网,基准角频率 ω_0 为 100π 。

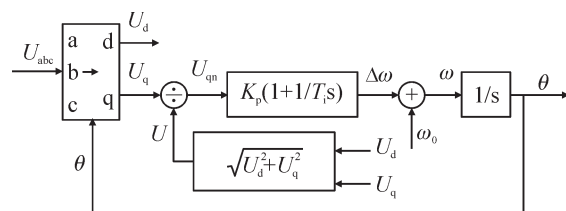


图 1 基于同步坐标系的锁相环
Fig. 1 PLL based on synchronous reference frame

1.2 瞬时相角的估计

STATCOM 等装置通过锁相环实时获得电网的频率和相角。理想情况下,所获得的频率和相角应不受输入量的幅值大小影响。对于图 1 的三相锁相环,如公共耦合点电压 U_{abc} 只有工频正序分量,则有公式

$$U_{qn} = \sin(\Delta\theta) \quad (1)$$

式中, $\Delta\theta$ 为 U_{abc} 工频正序分量的相角和图 1 中三相锁相环估计的相角 θ 之差。由于已采用电压幅值 U 对派克变换输出的 U_q 进行归一化,因此公式(1)没有相应的幅值信息,即和三相锁相环输入量 U_{abc} 的幅值无关,也就是说,受 U_{abc} 幅值变化的影响相对较小。

锁相环达到稳态时,鉴相器的输出 U_{qn} 为零或者其平均值为零。正常运行时,STATCOM 等装置的无功功率等输出量会变化,电网的负荷或电源可能会投入或退出,这些扰动相对较小,但都会对三

相锁相环产生一些影响,即锁相环鉴相器的输出 U_{qn} 不再为零。三相锁相环需要经过一个暂态过程,才能达到新的平衡,也就是 U_{qn} 再次为零。当然,电网也可能会发生短路、接地等故障,这些扰动相对较大,会对三相锁相环产生较大的影响,即锁相环鉴相器的输出 U_{qn} 会更远地偏离零。当然,锁相环经过一个较为剧烈的暂态过程,通常也会重新达到平衡,即 U_{qn} 再次为零。

该暂态过程的剧烈程度根据实际有所差异,在达到新的平衡之前, U_{qn} 不为零,即电网 U_{abc} 的相角和锁相环估计相角 θ 存在偏差,也就是说,锁相环估计的相角 θ 不能准确地跟踪电网 U_{abc} 的相角。这会对 STATCOM 等装置的控制性能,尤其是对 STATCOM 直流电压的稳定、无功功率的输出产生不利影响。

1.3 具有相角瞬时跟踪特性的锁相环

本文提出具有相角瞬时跟踪特性的三相锁相环,其结构见图 2。采用反正弦函数对鉴相器的输出 U_{qn} 进行处理,得到预期的电网 U_{abc} 相角和锁相环相角 θ 之间的偏差 $\Delta\theta$,然后用偏差 $\Delta\theta$ 修正锁相环估计的相角 θ ,得到估计的瞬时相角 θ_p ,公式为

$$\theta_p = \theta + \arcsin(U_{qn}) \tag{2}$$

当锁相环处于稳态时, U_{qn} 为 0, $\theta_p = \theta$,锁相环依然能准确跟踪相角;而当锁相环处于小扰动或者短路故障等引起的大扰动时, θ_p 在 θ 的基础上加上了预期的电网 U_{abc} 相角和锁相环相角 θ 之间的偏差 $\Delta\theta$,相当于对暂态时输出的估计相角做了前馈补偿,使得锁相环能快速跟踪暂态过程中实际的相角变化,加快过渡过程,从而减小由于锁相环跟踪偏差引起的直流电压波动,所以,本方法属于直流电压的基于相角前馈的补偿控制。

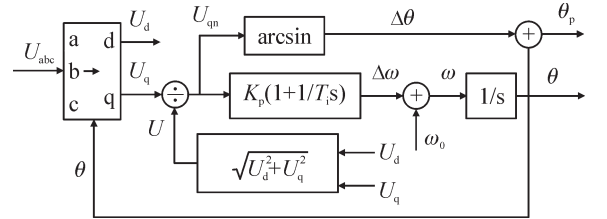


图2 具有相角瞬时跟踪特性的三相锁相环
Fig. 2 Three-phase PLL with instantaneous response

2 基于三相桥STATCOM的仿真系统

在 PSCAD 软件中搭建了 STATCOM 的等值仿真系统见图 3。电路部分具体包括 STATCOM 的三相三桥臂六开关的电压源换流器、直流电容器、滤波电容 C_f 、滤波电感 L_f 及其等效电阻 R_f ,电网的等

值交流电压源 U_{Gabc} 、等效电感 L_c 和等效电阻 R_c 。电路部分的参数值见表 1。控制部分采用经典的电压外环、电流内环的双环控制策略、dq 轴电流交叉解耦控制策略和三角载波比较调制方法,具体包括三相锁相环、电流坐标变换、电压坐标变换、直流电压控制、d 轴电流控制、q 轴电流控制、坐标反变换和脉宽调制(PWM)等环节。当电流坐标变换和电压坐标变换采用锁相环的瞬时相角 θ_p 时,相应控制为新控制。与之相对应,当电流坐标变换和电压坐标变换采用相角 θ 时,相应控制为传统控制。

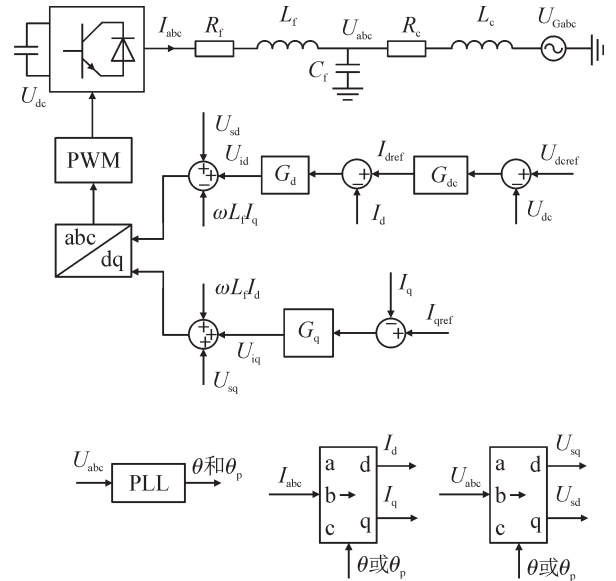


图3 STATCOM仿真等值系统
Fig. 3 Equivalent system STATCOM simulation

表1 仿真电路部分参数值
Table 1 Parameter of simulation circuit

参数	数值
直流电容容值 $C_{dc}/\mu\text{F}$	500
直流电压指令值 U_{dref}/V	800
滤波电感 L_f/H	0.004 6
滤波电感等效电阻 R_f/Ω	0.005
滤波电容 $C_f/\mu\text{F}$	7.6
电网等效电阻 R_c/Ω	0.2
电网等效电感 L_c/H	0.000 2
电网等值电源有效值 U_{Gabc}/V	380
基波频率 f_1/Hz	50
开关频率 f_s/kHz	15
装置额定容量 S_{base}/kVA	10

U_{dc} 为电压源换流器的直流电压, U_{dref} 为电压源换流器直流电压的指令值。 U_{abc} 为 STATCOM 的公共耦合点电压, U_{sd} 和 U_{sq} 分别是 U_{abc} 的 d 轴和 q 轴电压。 I_{abc} 为换流器输出电流, I_d 和 I_q 分别是 I_{abc} 的 d 轴和 q 轴电流, I_{dref} 和 I_{qref} 分别是 I_{abc} 的 d 轴和 q 轴电流指令值。

G_{dc} 为 STATCOM 直流电压的控制函数,采用 PI 控制。 G_d 和 G_q 分别为 d 轴电流控制和 q 轴电流控

制的控制函数,也采用PI控制,且*d*轴电流控制参数和*q*轴电流控制参数相同。表2详细给出了相应的控制参数值。

表2 仿真电路控制参数值	
Table 2 Parameter of the simulation control circuit	
参数	数值
直流电压环比例系数 K_{pi}	8
直流电压环积分时间常数 T_{in}	0.1
电流环比例系数 K_{pi}	2.122 3
电流环积分时间常数 T_{ii}	$1.413\ 6\times 10^{-4}$
锁相环比例系数 K_{pll}	92
锁相环积分时间常数 T_{pli}	2.362×10^{-4}

3 控制策略的仿真和对比分析

3.1 扰动的分类和约定

STATCOM 输出无功电流指令的跃变、电网电压幅值、相角、频率的小幅度变化都应属于正常工作下的小扰动。电网发生短路、接地等故障,电压的幅值、相角通常会发生显著改变,甚至电网的频率也会发生变化,这些应该属于大扰动。

1)无功电流指令的跃变。忽略 STATCOM 的过载能力,则无功电流指令的最大变化幅度为容性 1.0 p.u. 和感性 1.0 p.u. 之间的跃变。本仿真采用容性 1.0 p.u. 阶跃到感性 1.0 p.u.。

2)电压幅值的跃变。GB/T 12325—200《电能质量供电电压偏差》^[21]对供电系统电压偏差做出规范,220 V 单相供电电压允许的偏差范围最大,为标称电压的+7%,−10%。本仿真中的电压幅值变化幅度选为标称电压的 17%。

3)电压相角的跃变。确实没有找到相关标准对电压相角变化范围的规定。输电线路的工程经验认为线路两端的相角差达到 30°时,线路达到输送功率的功角稳定极限^[22]。30°也应该是正常运行情况下电压相角跃变的较大值,因此,本仿真中约定有 30°的相角跃变。

4)电压频率的跃变。GB/T15945—2008《电能质量电力系统频率偏差》^[23]对标称频率为 50 Hz 的电力系统频率偏差做出规范,正常运行条件下频率偏差限值为±0.2 Hz,当系统容量较小时,允许值范围为±0.5 Hz。本仿真采用−0.5 Hz。

5)短路故障。DL/T 1215.1《链式静止同步补偿器第 1 部分:功能规范》^[24]规定 STATCOM 的最低工作电压为 0.4 p.u.,仿真中约定故障持续期间,电网

电压幅值跌落到 0.4 p.u.。电网电压相角在短路故障前后可能有大到 90°的跃变^[25],仿真中约定采用最恶劣情况,即 90°的相角跃变。按照 GB/T15945—2008《电能质量电力系统频率偏差》的规范^[23],仿真中约定电网电压的频率有 0.5 Hz 的变化。

3.2 无功电流指令的跃变

STATCOM 无功电流指令阶跃的仿真图见图 4。1.0 s 时,STATCOM 的*q*轴指令电流由 1.0 p.u. 跃变为 −1.0 p.u.,即容性 1.0 p.u. 跃变为感性 1.0 p.u.。直流电压波动范围与响应时间 t_s (实际值进入并维持在指令值±1%范围内的对应时间,以下例子,如无特殊说明都按此标准)列于图中。可见 STATCOM 直流电压的波动范围相同,新控制的响应时间略慢于传统控制,但差距不大。

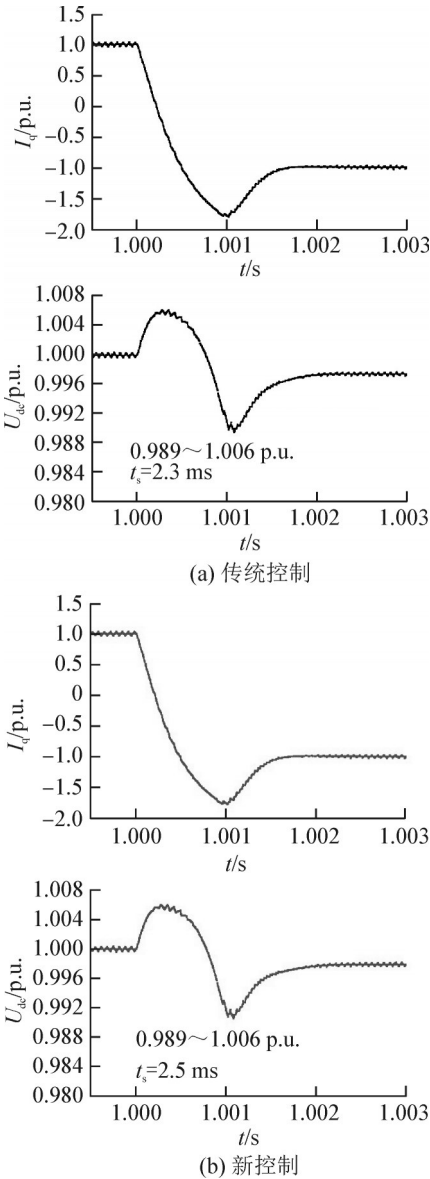


图4 无功电流阶跃的仿真曲线
Fig. 4 Simulation waveform in step of reactive current

3.3 电压幅值的跃变

电压幅值跃变的仿真结果见图 5。1.5 s 时,网侧电压源电压由 1.07 p.u. 突降到 0.90 p.u.。此时,STATCOM 输出的无功功率会随之变化。仿真中约定 STATCOM 无功电流的指令值由-0.7 p.u. 跃变为 1.0 p.u.,即忽略无功电流指令值变化的过程。由图 5 可知,STATCOM 直流电压的波动范围相同,新控制的响应时间略快于传统控制,但差距不大。

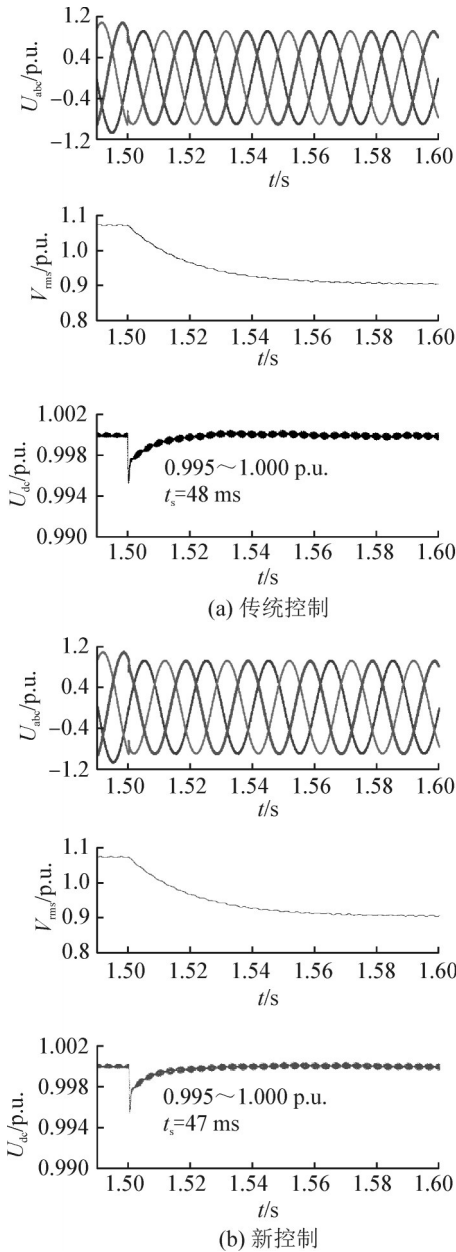


图 5 电压幅值变化的仿真曲线
Fig. 5 Simulation waveform of in variation of voltage amplitude

电压幅值变化的无功功率响应曲线见图 6。在应对电压幅值跃变工况时,传统控制和新控制的无功功率响应特性基本相同。

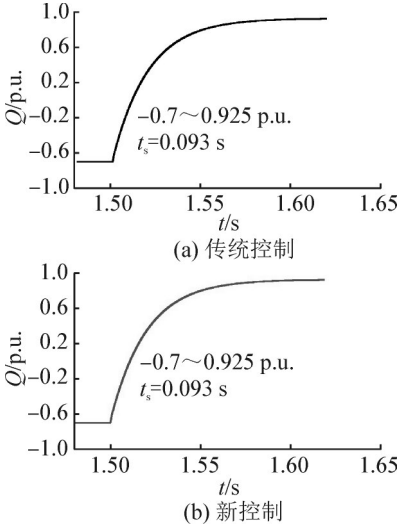


图 6 电压幅值变化时的无功功率曲线
Fig. 6 Reactive response curves in variation of voltage amplitude

3.4 电压相角的跃变

电压相角变化的仿真曲线见图 7。2.0 s 时,网

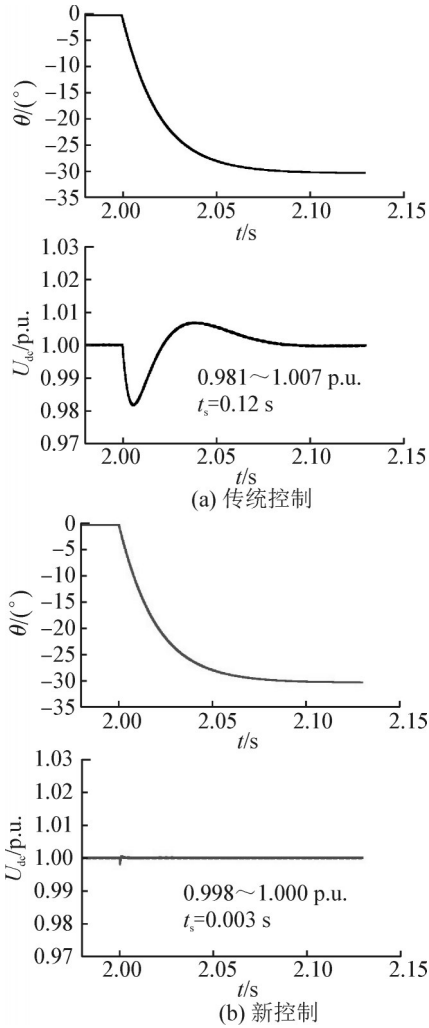


图 7 电压相角变化的仿真曲线
Fig. 7 Simulation waveform in variation of voltage phase angle

侧电压源电压相角由 0° 跃变为 -30° 。此时,约定 STATCOM 的 q 轴指令电流 I_q 保持不变,一直为 0.2 p.u.。显然,新控制的直流电压波动范围要远小于传统控制,响应时间约为传统控制的 1/40,新控制在应对电压相角跃变工况时的直流电压暂态性能要优于传统控制,且效果显著。

图 8 给出了传统控制时,锁相环相角差和直流电压的仿真结果。直流电压和锁相环相角差到达各自峰值的时间与到达稳态值的时间差距都不大。当相角差趋于 0 时,直流电压也趋于稳定。这表明锁相环相角差与直流侧电压存在关联性。其实,锁相环相角差的存在,导致换流器和电网交换的有功功率也存在差异,而有功功率的变动直接影响直流电压的波动特性。新控制采用瞬时相角 θ_p ,显著弱化了电压相角跃变对换流器和电网交换的有功功率的影响,这应是新控制的直流电压暂态性能优于传统控制的原因所在。

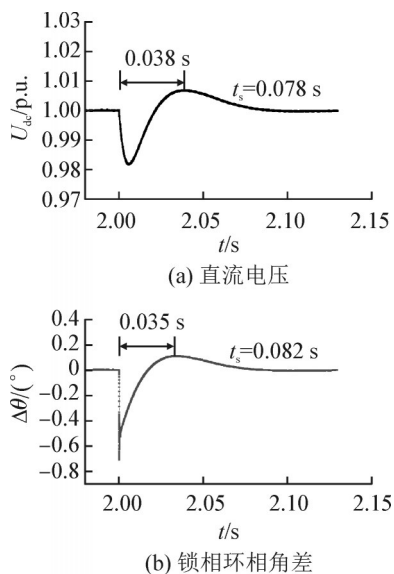


图 8 直流电压和锁相环相角差的暂态响应曲线
Fig. 8 Transient response of DC voltage and PLL phase difference

3.5 电压频率的跃变

电压频率变化的仿真曲线见图 9。2.0 s 时,网侧电压源电压频率由 50 Hz 跃变为 49.5 Hz。此时,约定 STATCOM 的 q 轴指令电流 I_q 为 0.2 p.u.,保持不变。电压频率的跃变导致电压相角的变化,新控制采用瞬时相角 θ_p ,能实时准确地估计出电压的相角,换流器直流电压的暂态特性也应好些。仿真结果符合预期,即新控制的 STATCOM 直流电压对频率变化的抗扰性较强,基本没有波动,优于传统控制,且效果显著。

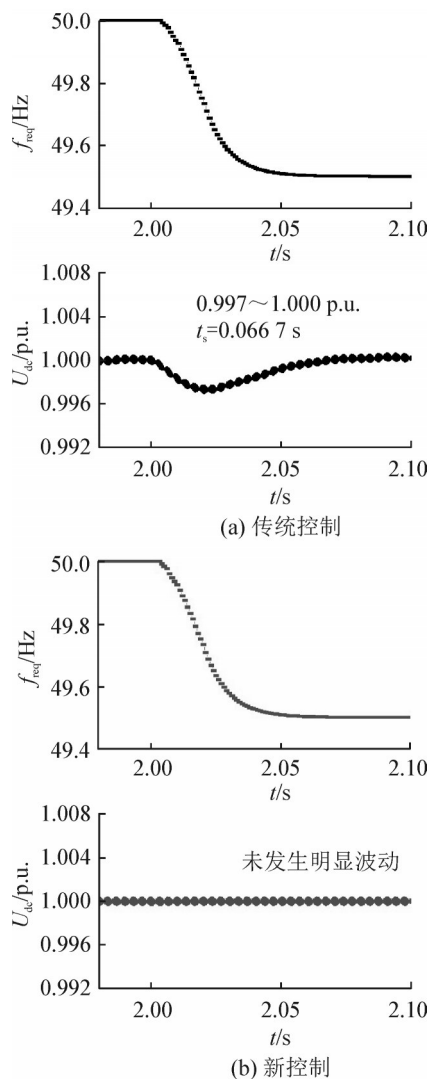


图 9 电压频率变化的仿真曲线
Fig. 9 Simulation waveform in variation of voltage frequency

3.6 短路故障

短路故障时的仿真曲线见图 10。本文采用网侧电源电压的突变来模拟电网发生短路故障。2.5 s 时,网侧电源电压的幅值由 1.0 p.u. 跌落到 0.4 p.u.,相角由 0° 跃变为 -90° ,频率由 50 Hz 跃变为 49.5 Hz。STATCOM 输出无功功率会随之变化,仿真中约定 STATCOM 无功电流的指令值由 0.2 p.u. 上升到 1.0 p.u.,即忽略无功电流指令值变化的过程。

与传统控制相比,新控制的直流电压波动范围要小许多,且很快到达稳态值,响应时间仅为传统控制的 24%。毫无疑问,新控制有着更优的直流电压暂态控制性能。

图 11 为 STATCOM 输出无功功率的响应曲线。STATCOM 输出的无功功率均由 0.23 p.u. 增加到 0.4 p.u.,传统控制的无功功率响应时间为 0.038 s,新控制的无功功率响应时间为 0.032 s。

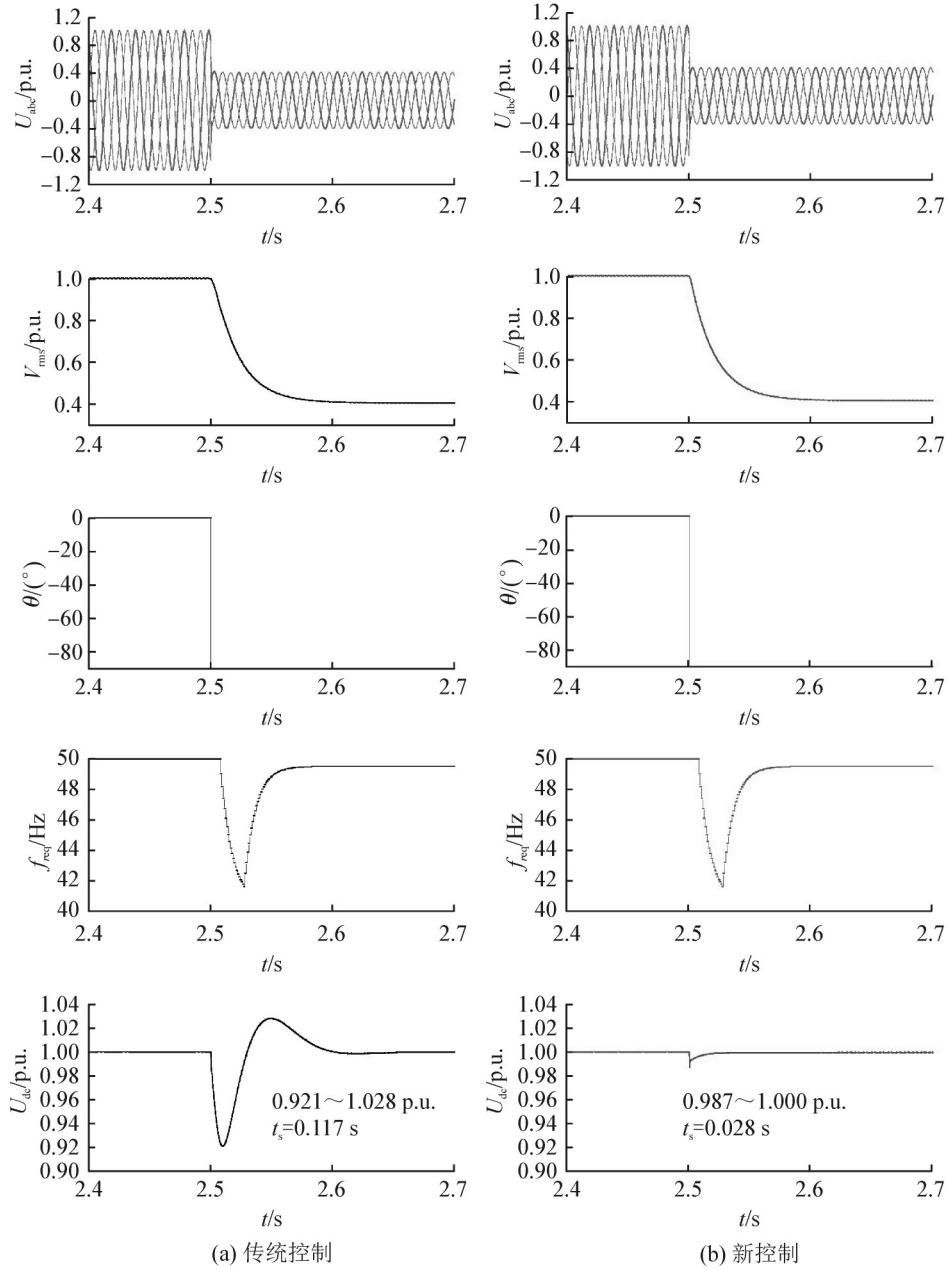


图 10 短路故障时的仿真曲线
Fig. 10 Simulation waveform in short circuit fault

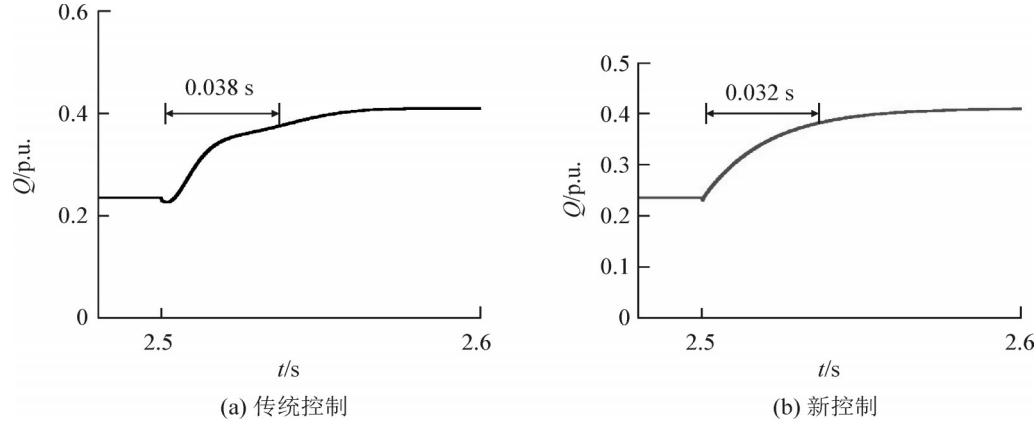


图 11 短路故障时的无功功率曲线
Fig. 11 Reactive power curve in short circuit fault

不难看出,新控制的无功功率响应时间更小,即响应速度更快。短路故障的相位跃变量比较大,达 90° ,新控制相角瞬时跟踪特性的优势得到充分发挥,STATCOM输出的无功功率受锁相环相位差影响较小,从而具有略快的响应速度。

3.7 控制效果对比

表 3-4 给出传统控制和新控制 STATCOM 直流电压响应时间和波动范围的对比结果。无功电流指令跃变和电压幅值跃变时,PCC 点电压的相角基本上没有变化,图 2-3 中的瞬时相角 θ_p 优势无法发挥出来,因此,传统控制和新控制的直流电压控制特性基本上没有差别。电压相角跃变、电压频率跃变和短路故障时,PCC 点电压的相角有显著变化,图 2-3 中的瞬时相角 θ_p 优势能充分发挥出来,因此,新控制的直流电压控制特性要显著优于传统控制。

表 3 直流电压的响应时间对比 Table 3 Comparison of DC voltage response time		
工况	传统控制响应时间/s	新控制响应时间/s
无功电流指令阶跃	0.002 3	0.002 5
电压幅值跃变	0.048	0.047
电压相角跃变	0.12	0.003
电压频率跃变	0.066	0
短路故障	0.117	0.028

表 4 直流电压的波动范围对比 Table 4 Comparison of DC voltage fluctuation range		
工况	传统控制电压波动/p.u.	新控制电压波动/p.u.
无功电流指令阶跃	0.989~1.006	0.989~1.006
电压幅值跃变	0.995~1.0	0.995~1.0
电压相角跃变	0.981~1.007	0.998~1.0
电压频率跃变	0.997~1.000	波动不明显
短路故障	0.921~1.028	0.987~1.000

3.8 减小直流电容容值

仅限于表 4 所列的工况,对新控制在减小直流电容容值做进一步阐述。首先从上述工况中找到最恶劣的工况,即电压波动幅值最剧烈的工况。接着减少新控制的直流电容容值,直至达到与传统控制相同的性能要求为止。预期通过直流电容容值的差异来说明新控制的优越性。

对于传统控制,电压最大与最小值都出现在短路故障,而新控制电压的最大值出现在无功电流指令阶跃,最小值出现在短路故障。

当直流电容值减少到 $110\text{ }\mu\text{F}$ 时,新控制的无功电流阶跃仿真波形见图 12。此时直流电压最大值为 1.028 p.u. ,与传统控制各种工况中的电压

最大值相等。新控制电压最小值出现在短路故障,见图 12,其值为 0.936 p.u. ,仍然大于传统控制中的电压最小值。此时新控制直流侧电容仅为传统控制的 22%,且新控制的电压波动区间还要小些。这应该能说明新控制能降低直流电容容值要求的程度。

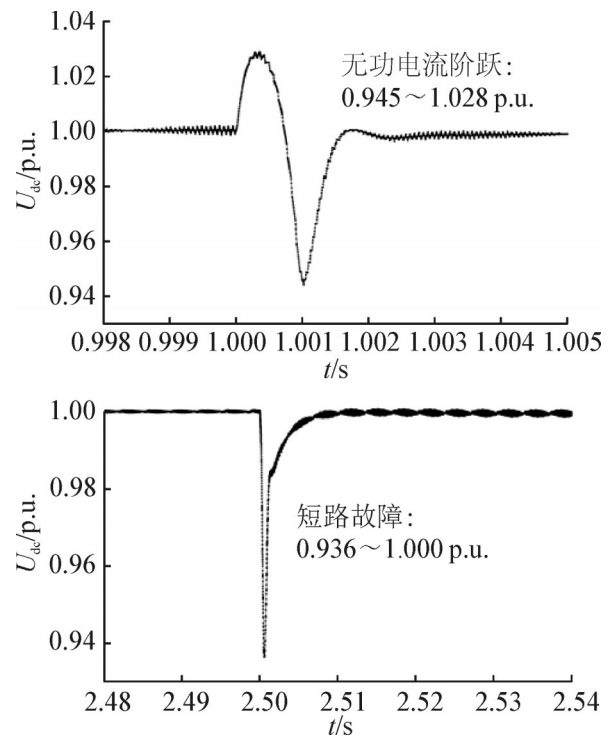


图 12 电容减小后的仿真结果($C=110\text{ }\mu\text{F}$)
Fig. 12 Simulation results after capacitance reduction ($C=110\text{ }\mu\text{F}$)

4 基于级联 H 桥的仿真系统分析

三相桥式 STATCOM 通常应用在低压场景,高电压大容量应用场景通常采用 H 桥级联 STATCOM。

4.1 基于级联 H 桥的 STATCOM 仿真系统

H 桥级联的 STATCOM 仿真系统见图 13。变压器采用 Y_0/Y_0 连接,变比为 $525\text{ kV}/35\text{ kV}$ 。STATCOM 采用链式级联的拓扑,每相有 16 个模块串联而成,STATCOM 通过连接电感 L 及其等效电阻 R 连接到变压器。 U_{Gabc} 为电网等效电压源, L_g 与 R_g 为电网等值电抗与等效电阻。仿真系统的参数值详见表 5。

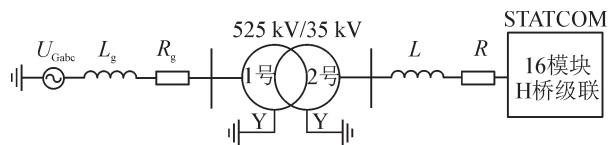


图 13 H 桥级联 STATCOM 的仿真系统
Fig. 13 Simulation system of H-bridge cascaded STATCOM

表5 仿真系统部分参数值
Table 5 Parameter of the simulation system

参数	案值
模块直流电容 $C_{dc}/\mu\text{F}$	10 000
模块直流电压指令值 U_{dcref}/kV	2.1
连接电感 L/H	0.002
连接电阻 R/Ω	0.01
电网等效电阻 R_g/Ω	6.9
电网等效电感 L_g/H	0.2
电网等值电源有效值 U_{Gabc}/kV	525
基波频率 f_1/Hz	50
功率模块开关频率 f_s/Hz	275
变压器正序漏电抗	12%
变压器额定容量 S_T/MVA	180
STATCOM 额定容量 S_{base}/MVA	120

4.2 直流电压的仿真对比

基于新控制对前述的无功电流指令阶跃和电压幅值跃变这两种工况的提升效果不明显,但对电压相角跃变、电压频率跃变和短路故障 3 种工况的提升效果较为显著,因此,H 桥级联 STATCOM 直流电源的对比也聚焦于后 3 种工况。表 6~7 给出仿真结果。限于篇幅,仅给出电压相角跃变的直流电压仿真曲线,即图 14~15。

表6 直流电压的响应时间对比(级联H桥)
Table 6 Comparison of DC voltage response time (cascaded H-bridge)

工况	传统控制响应	新控制响应
	时间/s	时间/s
电压相角跃变	0.1	0.03~0.06
电压频率跃变	0.05	0.01
短路故障	0.3~0.4	0.28

表7 直流电压的波动范围对比(级联H桥)
Table 7 Comparison of DC voltage fluctuation range (cascaded H-bridge)

工况	传统控制电压	新控制电压
	波动/p.u.	波动/p.u.
电压相角跃变	0.955~1.062	0.952~1.048
电压频率跃变	0.976~1.025	0.978~1.018
短路故障	0.820~1.210	0.901~1.073

0.7 s 时,电网等效电压源相角由 0° 跃变为 -30° ,传统控制和新控制的功率模块直流电压仿真曲线分别见图 13~14 所示。传统控制的电压波动范围为 0.955~1.062 p.u.,0.1 s 后恢复到稳态;新控制的电压波动范围为 0.952~1.048 p.u.,0.03~0.06 s 恢复到稳态。在相角跃变时新控制的暂态响应速度更加迅速,且电压波动范围更小。

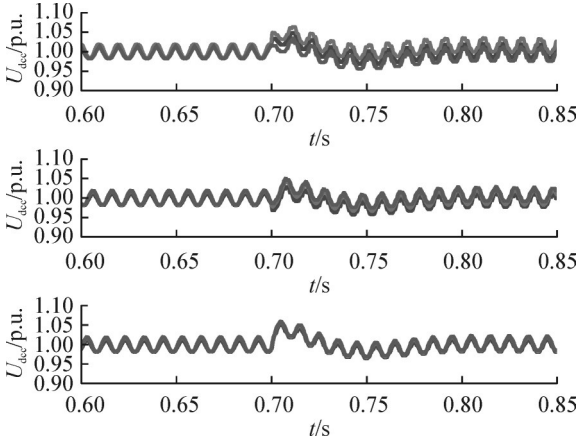


图14 电压相角跃变时的仿真曲线(传统控制)
Fig. 14 Simulation curves in step of voltage phase angle (traditional control)

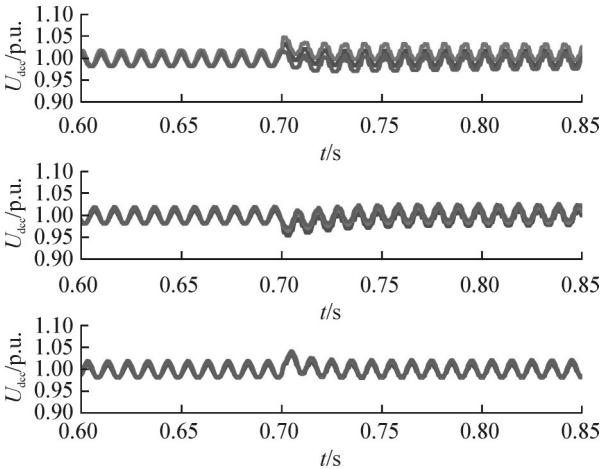


图15 电压相角跃变时的仿真曲线(新控制)
Fig. 15 Simulation curves in step of voltage phase angle (novel control)

4.3 不同拓扑直流电压稳定效果差异的原因

通过表 3 与表 4,综合对比三相桥拓扑与 H 桥级联 STATCOM 应用新方法对改善直流电压的波动效果。以短路故障时为例,可得新方法下:三相桥的波动幅度为 0.017 p.u.,而级联 H 桥的波动幅度为 0.172 p.u.,其余工况类似,可见新方法在三相桥 STATCOM 中效果更好,最终的直流电压波动幅度较小,而在 H 桥级联装置的应用中也有不少提升,但直流电压波动幅度较大。差异原因解释如下:

1) 经过相角差补偿后的相角要经过一个滤波环节,该滤波环节会使输出有一定延时。三相桥系统开关频率为 15 kHz,输出曲线比较平滑,因此滤波环节的时间常数小,甚至可以不设;而 H 桥级联的换流链等效开关频率为 8.8 kHz,需要时间常数较大的滤波环节来抑制高频分量。时间常数大,跟踪的时间就长,相角前馈的补偿效果就差些,导致直流电压波动范围更大。

2) 直流侧电容容量与装置额定容量的比值不同导致直流电压的稳定性不同。直流侧电容的无功功率 Q 公式为

$$Q = 2\pi f C u^2 \quad (3)$$

式中: f 为工频; C 为电容器容量; u 为电容两端电压。

电容储存的电势能占装置额定容量的比例 p 公式为

$$p = \frac{Q}{S} \quad (4)$$

式中: Q 为电容的无功功率; S 为 STATCOM 装置的额定容量。设定三相桥 STATCOM 中该比例值为 p_1 , 其值为 10.053, 级联 H 桥的该比例值为 p_2 , 其值为 5.542。三相桥 STATCOM 中电容储存的无功功率占比更高, 在暂态过程中, 储存更多的能量会更有效的削弱电压的波动, 所以在同种控制下, 三相桥的电压波动要小于级联 H 桥。

5 结语

在分析三相锁相环鉴相器输出特性的基础上, 提出了具有相角瞬时跟踪特性的三相锁相环, 实现系统遭受扰动时锁相环估计相角快速追踪的同时削弱了直流侧电容电压的波动。搭建的三相桥和级联 H 桥 STATCOM 两种 STATCOM 拓扑进行仿真验证的结果表明, 当公共连接点电压相角在扰动过程中有显著变化时, 新控制的直流电压控制特性要显著优于传统控制。在此基础上, 经过仿真验证新控制能显著降低对所需电容的容值要求, 最后分析了两种拓扑直流电压改善效果的差异。

参考文献

- [1] 姚为正, 刘刚, 胡四全, 等. 应用于 LCC-HVDC 弱受端的链式 STATCOM 改进控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3662-3670.
YAO Weizheng, LIU Gang, HU Siqian, et al. Research on improved control strategies of STATCOM for LCC-HVDC weak receiving station[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3662-3670.
- [2] PARK J, YEO S, CHOI J. Development of ± 400 Mvar world largest MMC STATCOM[C]// 2018 IEEE EMECS (IEEE Electrical Machinery and Energy Conversion Systems), 2018.
- [3] PISANI C, PALONE F, GIANNUZZI G, et al. 125 Mvar STATCOM systems for oscillation damping and supporting HVDC_x0002_LCC reactive power unbalance, 2022[C]// Session Materials, 2022.
- [4] 刘引弟, 刘会强, 邢华栋, 等. STATCOM 抑制低频振荡及稳定电压在风电场中的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 18-25.
LIU Yindi, LIU Huiqiang, XING Huadong, et al. Study on the application of suppressing low frequency oscillation and stabilizing voltage by STATCOM in wind farm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 18-25.
- [5] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630.
- [6] HEYDAR R, ZHANG H. Grid-forming control for STATCOM—A robust solution for networks with a high share of converter-based resources[Z]. 2022.
- [7] 雷二涛, 马明, 梁晓兵. 配网链式 D-STATCOM 自适应无源控制技术[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(6): 48-52.
LEI Ertao, MA Ming, LIANG Xiaobing. Adaptive passive control technology for distribution network cascaded D-STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(6): 48-52.
- [8] 陈继开, 胡阳, 李浩茹, 等. 级联 H 桥 STATCOM 直流电压失衡分析与控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(3): 36-43.
CHEN Jikai, HU Yang, LI Haoru, et al. DC voltage unbalance analysis and control strategy for cascaded H-bridge STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(3): 36-43.
- [9] 封磊, 苟锐锋, 张万荣, 等. 10 kV 链式星接 STATCOM 直流电容参数计算与均压策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 24-31.
FENG Lei, GOU Ruifeng, ZHANG Wanrong, et al. Calculation of DC capacitor parameter and grading strategy for 10 kV cascaded star-connected STATCOM[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3): 24-31.
- [10] 章小卫, 李耀华, 周京华, 等. 链式 STATCOM 的直流电容电压平衡控制策略[J]. 电力电子技术, 2019, 53(6): 1-4.
ZHANG Xiaowei, LI Yaohua, ZHOU Jinghua, et al. Direct current capacitor voltage balancing control strategy for cascade STATCOM[J]. Power Electronics, 2019, 53(6): 1-4.
- [11] WANG X, TAUL M G, WU H, et al. Grid-synchronization stability of converter-based resources—an overview[J]. IEEE Open Journal of Industry Applications, 2020(1): 115-134.
- [12] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1-16.
ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1-16.
- [13] REMON D, CANTARELLAS A M, RAKHSHANI E, et al. An active power synchronization control loop for grid-con-

- nected converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1): 297-306.
- [14] TEODORESCU R, LISERRE M, RODR GUEZ P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [15] DONG D, WEN B, BOROEYEVICH D, et al. Analysis of phase-locked loop low-frequency stability in three-phase grid-connected power converters considering impedance interactions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 310-321.
- [16] CHEN J, LIU M, GENG H, et al. Impact of PLL frequency limiter on synchronization stability of grid feeding converter[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(3): 2487-2490.
- [17] 陈俊儒, 李冠群, 刘牧阳, 等. 电网阻抗比对跟网变换器同步稳定性的影响机理[J]. 中国电机工程学报, 2022: 1-10.
- CHEN Junru, LI Guanqun, LIU Muyang, et al. Influence mechanism of R/X ratio on synchronization stability of grid-following converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022: 1-10.
- [18] 杨苓, 陈燕东, 陈智勇, 等. 弱电网下考虑锁相环影响的三相并网系统相角补偿控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20): 6099-6109.
- YANG Ling, CHEN Yandong, CHEN Zhiyong, et al. The phase compensation control method considering the effect of phase locked loop for three-phase grid-connected system in the weak grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6099-6109.
- [19] 刘锦宁, 刘洋, 何伟斌. ± 200 MVA STATCOM装置直流电压控制策略优化[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3428-3433.
- LIU Jinning, LIU Yang, HE Weibin. Control strategy optimization of DC voltage of ± 200 MVA STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3428-3433.
- [20] 张思缘, 李梦, 李少林, 等. 基于动态特性对称补偿的并网变流器稳定控制方法[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1648-1657.
- ZHANG Siyuan, LI Meng, LI Shaolin, et al. Stability control method for grid-connected converters based on symmetric compensation of dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1648-1657.
- [21] 电能质量供电电压偏差: GB/T 12325—2008 [S]. 2008.
- Power quality - Deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008 [S]. 2008.
- [22] 徐政. 直流电力系统动态行为分析[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [23] 电能质量电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008 [S]. 2008.
- Power quality frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008 [S]. 2008.
- [24] 链式静止同步补偿器第1部分: 功能规范: DL/T 1215.1—2020 [S]. 2020.
- Code for remote sensing dynamic monitoring of power grid engineering construction: DL/T 1215.1—2020 [S]. 2020.
- [25] 张琛, 蔡旭, 李征. 全功率变换风电机组的暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4018-4026.
- ZHANG Chen, CAI Xu, LI Zheng. Transient stability analysis of wind turbines with full-scale voltage source converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4018-4026.

作者简介:

刘宇轩(1998—)男, 研究生, 主要研究方向为电力系统动态无功补偿技术。E-mail: 2287792708@qq.com。

戴朝波(1972—)男, 正高级工程师, 主要研究方向为动态无功补偿、串联电容补偿装置、故障电流限制器、半波长交流输电、电力电容器应用等。

赵国亮(1978—), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为交流柔性输配电、柔性低频输电等技术。

李彬(1983—), 男, 副教授, 主要研究方向为电力通信、电气信息技术相关研究。

孙毅(1972—), 男, 教授, 主要研究方向为能源互联网及其信息技术、物联网及现代传感技术。

陆振纲(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为柔性输配电系统分析设计技术与应用。