DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.232　　中图分类号：TM714.3　　文献标志码：A

STATCOM 响应速度对电网电压的影响和对策

戴朝波(中国电源学会会员)，赵国亮，于弘洋，杨志昌
(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：针对电网电压变化较快时静止同步补偿器 STATCOM(static synchronous compensator)响应速度慢导致所提供的无功功率助增并网点过电压的问题，提出助增过电压的通用判据及技术指标。通过基于电压基波幅值的简化分析得到 STATCOM 响应速度慢导致的助增过电压严重程度及对交流电压值的定量计算要求，提出了基于二阶广义积分器的电压快速算法及其配合策略，应用来自实际工程的 STATCOM 主电路拓扑和控制策略，通过简单的电网戴维宁等效电路仿真和复杂的直流标准测试系统的数字仿真，表明所提策略可以解决 STATCOM 助增过电压问题。

关键词：静止同步补偿器；静止无功发生器；二阶广义积分器；动态无功补偿

Impact of STATCOM Response Speed on Grid Voltage and Corresponding Countermeasure

DAI Chaobo, *Member*, *CPSS*, ZHAO Guoliang, YU Hongyang, YANG Zhichang
(State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

Abstract: To deal with the over-voltage increase at the point of common coupling by the reactive power of a static synchronous compensator (STATCOM) due to its slow response speed when the grid voltage changes rapidly, a general criteria and technical indicators characterizing the over-voltage increase were proposed. Through a simplified analysis based on the magnitude of fundamental voltage, the severity of this over-voltage increase problem due to the slow response speed of STACOM was shown, and the quantitative requirement for calculating the AC voltage became clear. A fast voltage algorithm based on second-order generalized integrator and the corresponding coordination strategy were put forward. The main circuit topology of a STATCOM from a practical project and its control strategy were applied, and the digital simulation results from both a simplified Thevenin's equivalent circuit and a complicated HVDC benchmark system showed that the proposed fast algorithm and coordination strategy can solve the over-voltage increase problem.

Keywords: Static synchronous compensator (STATCOM); static var generator; second-order generalized integrator; dynamic reactive power compensation

静止同步补偿器 STATCOM(static synchronous compensator)是被广泛应用和长期研究的灵活交流输电装置[1]。韩国 Shinyoungju(新荣州)、Shinchungju(新忠州)和 Donghae(东海) 345 kV 变电站分别配置了补偿容量为±400 Mvar 的 STATCOM[2]。

响应速度是动态无功补偿装置的关键指标，韩国 STATCOM 交接试验结果显示，电压控制模式下，STATCOM 输出电流从 0 p.u.上升到 1.0 p.u.需 11.7 ms，约为 60 Hz 工频周期的 70 %[2]，响应速度

收稿日期：2023-12-05；**修回日期：**2024-02-09；**录用日期：**2024-02-28；**网络首发日期：**2024-04-26
基金项目：国家电网公司总部科技资助项目(5500-202158475A-0-5-ZN)
This work is supported by Headquarter Science and Technology Project of State Grid Corporation of China under the grant 5500-202158475A-0-5-ZN

较快。响应速度也是动态无功补偿装置方案比较时的关键指标。有研究表明，STATCOM 的响应速度比调相机快[3-4]，抑制暂时过电压 TOV(temporary overvoltage)的效果更好[5]，使清除故障后的电网电压恢复更快，在一定程度上还能避免因调相机方案响应速度慢导致的电压崩溃[6]。由此，出现了应用 STATCOM 实现快速补偿、用调相机提供短路电流和惯量的混合方案[7-8]。文献[9]比较了构网型 STATCOM 和调相机的响应速度，结论也是 STATCOM 优于调相机。与前述文献结论不同，文献[10]从频域、时域 2 个角度进行动态分析和对比，发现调相机能有效抑制系统工频过电压，而 STATCOM 由于存在延时环节，对于工频电压波动的抑制效果较差，甚至可能恶化。文献[11-12]也得出调相机较优的结论。

文献[13]认为风电汇集系统由于无功盈余造成的暂态过电压是近年来新出现的问题，这类问题主要受故障后暂态盈余无功和无功−电压灵敏度 2 个因素的影响，且风机和无功补偿装置在退出低穿状态后的无功电流撤回速度是影响暂态过电压的关键；文献[14]通过引入直流阻尼投切装置来抑制 STATCOM 助增过电压，即文献[13]无功电流撤回速度慢导致的暂态过电压问题，但这需要增加高压、大容量且快速动作的投切装置，存在成本、占地、可靠性等诸多挑战。显然，STATCOM 助增过电压问题未得到有效解决。

本文引入助增过电压的通用判据及技术指标，聚焦 STATCOM 装置本身，通过简化分析辨识出提高响应速度的关键，提出基于二阶广义积分器 SOGI(second-order generalized integrator)的电压快速算法及其配合策略，应用实际工程参数，通过仿真分析论证所提方法能解决助增过电压问题。

1　STATCOM 助增过电压

1.1　STATCOM 控制

图 1 为 STATCOM 的控制示意，通常采用电流内环、电压外环的双闭环反馈控制。电流内环响应速度较快，电压外环包括交流电压外环和直流电压外环，环路较长，响应速度较慢。

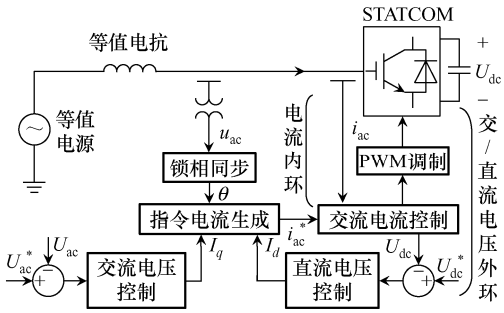


图 1　STATCOM 控制

Fig. 1 STATCOM control

STATCOM 呈现助增过电压现象的外部条件为，相对于 STATCOM 额定容量，所接入的交流电网不强，即 STATCOM 注入允许范围内的无功电流后并网点电压幅值变化不能忽略。STATCOM 呈现助增过电压现象的内部原因为，STATCOM 交流电压控制的响应速度较慢。显然，应对的关键在于在维持 STATCOM 直流电压稳定的前提下，提高交流电压控制外环的响应速度。

1.2　助增过电压的约定

在交流电压由低值突升到高值，然后回到或维持在稳态值的过程中，如有动态无功补偿时的交流电压最大值等于或小于无动态无功补偿时的最大值，则判定为未出现动态无功补偿装置助增过电压现象；如有动态无功补偿时的交流电压最大值大于无动态无功补偿时的最大值，则判定为出现了动态无功补偿装置助增过电压现象。通过引入助增过电压峰值和助增过电压持续时间来表征助增过电压现象。助增过电压峰值指出现助增过电压现象时的交流电压最大值。助增过电压持续时间指有动态无功补偿时交流电压大于无动态无功补偿时交流电压最大值的持续时间。

1.3　助增过电压的简化分析

图 2 为 STATCOM 的典型 *UI* 曲线[15]。现有工程实践通常约定 STATCOM 正常运行的最高工作电压为 1.3 p.u.，因此当交流电压大于 1.3 p.u.或小于现行行业标准 DL/T 1215.1 中的最低工作电压

0.4 p.u.时，STATCOM 要么闭锁，要么脱网，都不提供无功功率，也就不存在助增过电压问题。

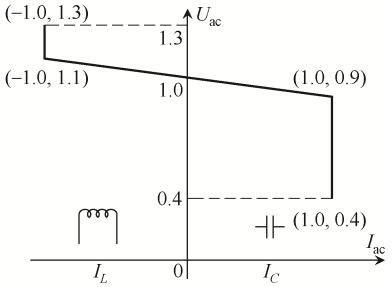


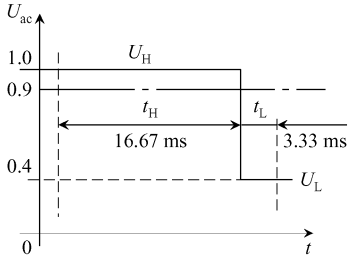
图 2 STATCOM 的典型 *UI* 曲线

Fig. 2 Typical *UI* curve of STATCOM

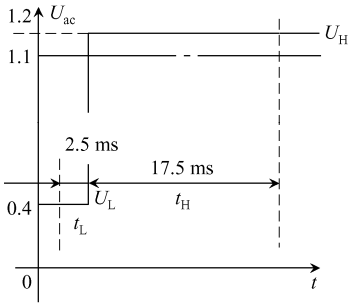
约定交流电压为纯正弦波形，图 3 为交流电压基波幅值跃变示意，图中，t_H 和 t_L 分别为 1 个工频周期内交流电压基波幅值为高值 U_H 和低值 U_L 的时间。忽略电压波形畸变和相角变化等影响，t_H、t_L、U_H、U_L 之间的关系可表示为

$$t_H + t_L = 20 \tag{1}$$

$$(U_H t_H + U_L t_L) / 20 = 0.9 \tag{2}$$



(a) 突降



(b) 突升

图 3 交流电压基波幅值的跃变

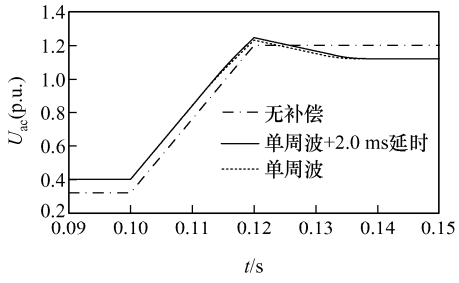
Fig. 3 Step changes in magnitude of AC fundamental voltage

对于突降工况，要得到图 2 中 0.9 p.u.的拐点电压值，通过式(1)和式(2)求解，得交流电压基波幅值由高值 U_H(1.0 p.u.)跃变为低值 U_L(0.4 p.u.)后 t_L(约为 3.33 ms)时，计算出的电压值下降到 0.9 p.u.。此时按图 2 的典型 *UI* 曲线，STATCOM 应输出容性 1.0 p.u.的无功电流。忽略 STATCOM 跟踪指令电流的过渡过程，输出电流从 0 转变到容性 1.0 p.u. 大致需 3.33 ms。

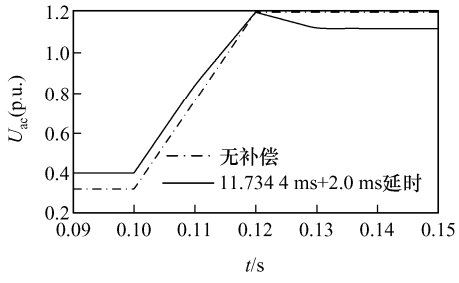
对于突升工况，图 2 拐点电压值为 1.1 p.u.，电压高值 U_H 应大于 1.1 p.u.且小于 1.3 p.u.。图 3(b)中的 t_H 值越大，说明电压值达到 1.1 p.u.的时刻越落后于交流电压基波幅值发生跃变的时刻，出现助增过电压现象的概率越大。然而当 U_L 给定时，U_H 应尽可能小，时间 t_H 才会尽可能大。按照所设定的等值电网强度，当 STATCOM 输出额定感性无功电流时，交流电压幅度改变 0.08 p.u.。如考虑 STATCOM 无功功率补偿对交流电压的影响，U_H 应大于 1.18 p.u.，再考虑适当的裕度，U_H 选为 1.20 p.u.。可以得出，交流电压基波幅值由 0.4 p.u.跃变为 1.2 p.u.后 17.5 ms 时，计算出的电压值才上升到 1.1 p.u.。此时按图 2 的典型 *UI* 曲线，STATCOM 应输出幅值为 1.0 p.u.的感性电流。同样，STATCOM 输出电流从容性 1.0 p.u.转变到感性 1.0 p.u.至少需要 17.5 ms，比突降工况的 3.33 ms 大得多。可见，此时出现助增过电压现象的概率较大，助增过电压程度会较严重。

约定 STATCOM 接入的电网不强，公共耦合点短路比为 12.5。交流电压基波幅值在 0.10 s 由 0.32 p.u.跃变到 1.20 p.u.。无动态无功补偿时，采用 1 个工频周期数据计算交流电压值，则公共耦合点电压值在 0.10 s 开始线性增加，在 0.12 s 达到并维持在 1.20 p.u.，相应的曲线为图 4(a)中标记有“无补偿”的曲线。由于 STATCOM 的无功补偿作用，在 0.1 s 前，公共耦合点电压值由 0.32 p.u.上升到 0.40 p.u.。如 STATCOM 输出电流需经过 2.0 ms 才能跟踪上指令电流，则相应的曲线为图 4(a)中标记有“单周波+2.0 ms 延时”的曲线。其中，助增过电压峰值为 1.245 27 p.u.，助增过电压持续时间为 6.914 06 ms。过电压助增量不大，持续时间也不长。上述电气参数值的设置对应 LCC-HVDC 动态

无功补偿场景：HVDC 短路比为 2.5，STATCOM 额定容量为 HVDC 额定容量的 20%，2.0 ms 为 STATCOM 输出电流跟踪指令电流过程中典型值中的大值。只有更小的短路比、更大的额定容量占比或更长的电流跟踪过渡过程，才能出现更严重的助增过电压现象。如进一步提升 STATCOM 电流跟踪性能，那么理想情况是没有延时，此时得到图 4(a)中标记有“单周波”的曲线。助增过电压峰值和助增过电压持续时间虽都有所改善，但改善幅度不大。实际 STATCOM 输出电流不可能无延时地跟踪指令电流，即提高电流跟踪性能带来的效果不显著，且难度比较大，不应成为解决助增过电压问题的优选路径。



(a) 单周波



(b) 快速算法

图 4　公共耦合点的电压值

Fig. 4 Voltage at PCC

如能找到快速算法快速估算出公共耦合点的电压值(不一定是严格意义上的电压有效值或基波幅值)，那么就能较快地获得相应的指令电流，这应是解决助增过电压问题的关键。通过数值计算发现，如能在 11.734 4 ms 内相对准确地估计出公共耦合点电压值，那么即使还存在长达 2.0 ms 的电流跟踪延时，公共耦合点电压最大值仍为 1.20 p.u.，即没有出现助增过电压现象，相应曲线如图 4(b)所示。

2　STATCOM 的仿真分析

2.1　H 桥级联 STATCOM 的简化等值系统

图 5 为 H 桥级联 STATCOM 的简化等值系统。STATCOM 三相换流链采用星形连接，中性点直接接地。STATCOM 参数值来自实际工程。对电压和电流按直流电压指令值、交流电压额定值、交流电流额定值等为基准分别进行标幺化，电网等值电抗大小为 0.08 p.u.，相应参数值详见表 1。PWM 采用单极倍频载波移相调制技术。交流电流控制采用 dq 电流解耦控制方法，相应的比例积分 PI(proportional-integral)调节参数有 k_{dq} 和 T_{dq}。同步采用基于二阶广义积分器的锁频环，相应参数有 k_{FLL} 和 Γ[16-17]。直流电压控制采用 PI 控制，相应的 PI 调节参数有 k_{dc} 和 T_{dc}。换流链相内电容电压平衡控制采用沿输出电流方向调整输出电压的经典方法，相应的 PI 调节参数有 k_{bal} 和 T_{bal}。

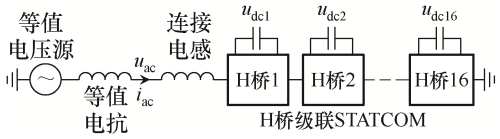


图 5　H 桥级联 STATCOM 的简化等值系统

Fig. 5 Simplified equivalent system of H-bridge cascaded STATCOM

表 1　STATCOM 的参数值

Tab. 1 Parametric values of STATCOM

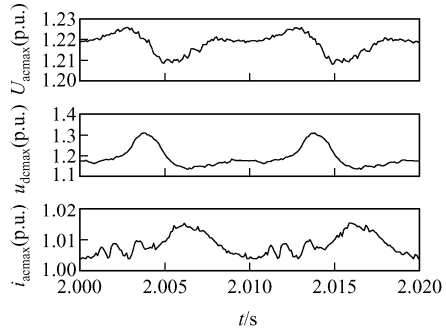
参数	数值	参数	数值
额定容量/MVA	120	k_{dq}	4.0
额定电压/kV	35	T_{dq}	0.1
连接电感/mH	2.0	k_{dc}	0.1
H 桥直流电容/μF	10 000	T_{dc}	0.1
H 桥直流电压指令值/kV	2.1	k_{bal}	1.0
H 桥开关频率/Hz	275	T_{bal}	0.2
H 桥级联数	16	k_{FLL}	$\sqrt{2}$
		Γ	46

2.2　单周波算法

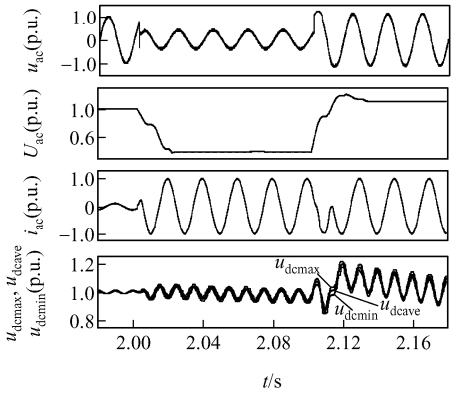
仿真时刻 2.00 s 前，公共耦合点电压约为 1.00 p.u.，此时，STATCOM 输出幅值为 0.10 p.u.容性电流。之后，电网等值电压源幅值由 1.02 p.u.突降到

0.32 p.u.，持续 0.10 s 后突升并维持在 1.20 p.u.。为获得在不同时刻电压突降时的 STATCOM 响应特性，在 2.00 s 到 2.02 s 的 1 个工频周期仿真时间段内，以 100 μs 为时间变化步长，总共扫描 200 个不同时刻电压发生突降的工况，图 6(a)为扫描结果。图中，U_{acmax}、u_{dcmax} 和 i_{acmax} 分别为 a 相的公共耦合点电压有效值、16 个 H 桥直流电压值和输出电流绝对值在前述突降后又突升这一扰动过程中的最大值。无论电压何时发生突降，U_{acmax} 始终大于 1.20 p.u.，即 STATCOM 始终出现助增过电压现象；扫描结果和图 4 基于电压幅值的简化分析结果相符。

从图 6(a)可得，当电压突降发生在 2.002 7 s 时，助增过电压峰值达到最大值 1.225 83 p.u.。图 6(b)给出相应的仿真波形，u_{dcmax}、u_{dcmin} 和 u_{dcave} 分别为 a 相 16 个 H 桥直流电压的最大值、最小值和平均值。可以看出，尽管公共耦合点电压和输出电流同时发生剧烈变化，16 个 H 桥直流电压都没有发散，均能稳定在指令值附近。



(a) 扫描结果



(b) 仿真结果

图 6 基于单周波数据的扫描结果和仿真结果

Fig. 6 Scanning and simulation results based on one-period data

2.3 快速算法

图 7 为基于 SOGI[16]的快速算法，图中：u 为输入信号；k 为阻尼系数；ω 为谐振角频率；U_{f} 为电压快速估计值。如 STATCOM 控制采用基于 SOGI 的锁频环，则可由锁频环来提供正交信号 v_d 和 v_q，进一步减少计算量。

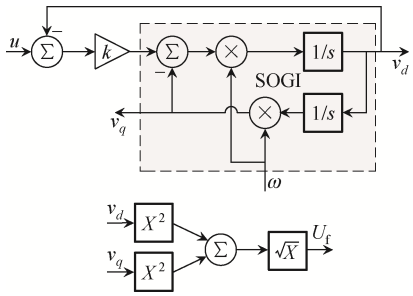


图 7 基于 SOGI 的快速算法

Fig. 7 SOGI-based fast algorithm

约定 ω 选电网角频率，忽略频率差时为 100π。兼顾算法的快速性和超调量，k 选 $\sqrt{2}$ [16]。输入信号 u 从 0 跃变为单位幅值正弦波形，当跃变发生时刻 u 的初相角由 0°逐步增加到 180°时，U_{f} 达到稳态值 1.0 的 90 %的响应时间变化曲线如图 8 所示，响应时间在 5.06 ms 和 10.77 ms 之间变化，始终小于 1.3 节的 11.734 4 ms，预期不会出现助增过电压现象。

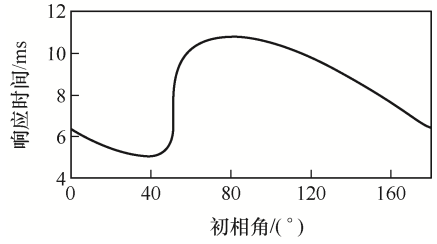


图 8 快速算法的响应时间

Fig. 8 Response time of fast algorithm

交流电压幅值快速估计的方法有很多，选用基于 SOGI 的快速算法最根本的原因为其快速性。其优点还包括能跟踪电网频率变化、易懂、易实现、计算量较小，以及能适用单相和三相系统。考虑到电网电压有可能包含较多谐波分量，因此，基于 SOGI 的快速算法对谐波分量具有抑制功能是较为重要的优点。按照图 7，通过推导和简化得到传递函数为

$$\frac{U_{\mathrm{f}}}{U}\approx\left\|\frac{ks+k\omega^2}{s^2+ks+\omega^2}\right\| \tag{3}$$

式中：U 为 u 的幅值；‖ ‖表示取模。

根据式(3)，可以得到如图 9 所示的频域响应曲线。可以看出，工频附近略有放大，最大值约为 1.098 4，可忽略；高频段区域，对谐波分量有显著的衰减作用；低频段区域，既没有放大也没有衰减，等于 1.0，即 0 dB。

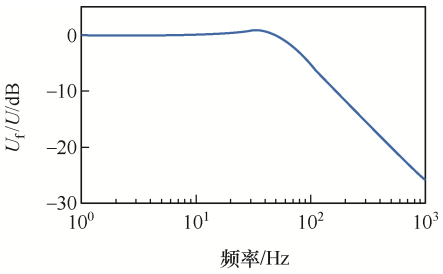


图 9　快速算法的频域响应

Fig. 9 Frequency-domain response of fast algorithm

除图 2 的典型 *UI* 曲线电压输入量采用快速算法的估计值，即采用图 9 的 U_{f}，其他的仿真条件和 2.1 节、2.2 节中均相同，图 10 为对应的扫描结果。可以看出，无论电压何时发生突降，U_{acmax} 始终小于 1.20 p.u.，即不会出现助增过电压现象，符合预期；直流电压最大值和输出电流最大值的波动范围均变小。

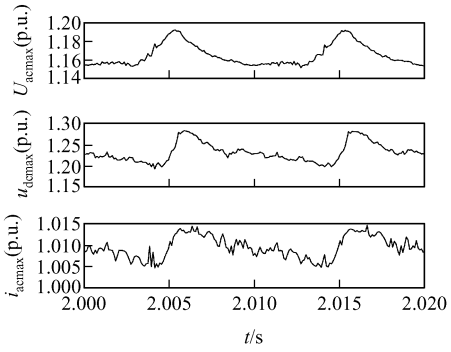


图 10　基于快速算法的扫描结果

Fig. 10 Scanning results based on fast algorithm

3　直流标准系统的对比分析

3.1　直流标准系统

仿真系统如图 11 所示，在 CIGRE HVDC 第一版 A1 标准测试系统基础上，在受端交流母线处额外增加并联电容器组，让稳定运行时受端交流母线电压 U_{I} 增加到 1.153 p.u.。在 HVDC 受端交流母线处还并联有受控的并联电感 L_{sc}，当该并联电感投入后，受端交流母线电压 U_{I} 由 1.0 p.u.下降到 0.5 p.u.左右，以此来模拟电网发生的故障。STATCOM 和升压变压器的参数见表 2，STATCOM 的控制策略和参数均不变。

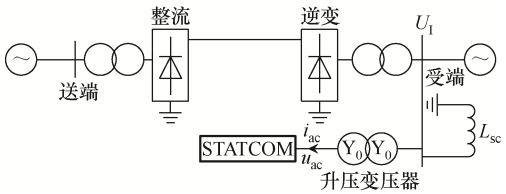


图 11　基于 CIGRE-HVDC 的仿真系统

Fig. 11 Simulation system based on CIGRE-HVDC

表 2　仿真系统的参数值

Tab. 2 Parametric values of simulation system

参数	数值
额定容量/MVA	200
连接电感/mH	1.2
H 桥直流电容/μF	30 000
H 桥直流电压指令值/kV	2.1
H 桥开关频率/Hz	275
变压器额定容量/MVA	300
变压器正序漏抗/p.u.	0.12
变压器变比	35/230

3.2　对比分析

在 2.0 s 仿真时刻，并联电感 L_{sc} 通过开关投入，0.1 s 后退出。图 12 为无动态无功补偿、基于单周波算法的 STATCOM、基于快速算法的 STATCOM 3 种工况的受端交流母线电压 U_{I} 变化曲线。每条曲线的 2 个数据分别为 2.0~2.5 s 时间段内受端交流母线电压 U_{I} 的最大值和最小值。为减少快速算法可能带来的不利影响，采用了减少应用基于 SOGI 的快速算法结果的措施，以期在算法的快速性和准确性方面取得较好的平衡。具体措施为：只有当电压值小于 0.9 p.u.或大于 1.1 p.u.或单周波计算出的电压值和基于 SOGI 快速算法计算出的电压值相差大于 0.1 p.u.时，才采用快速算法计算出的电压值去获得相应的 STATCOM 电流指令值。需要补充的

是，0.9 p.u.和 1.1 p.u.这 2 个电压值依据图 2 中 *UI* 曲线的拐点电压值，如 *UI* 曲线不同，对应的电压值也应相应调整。

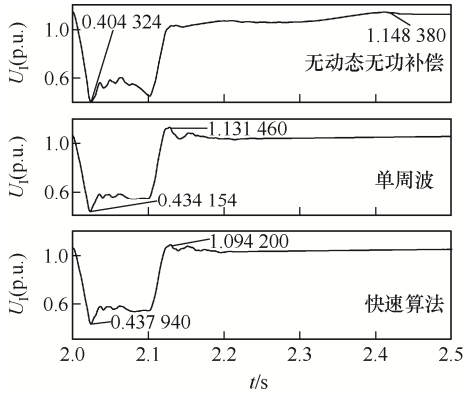


图 12 受端交流母线电压的对比

Fig. 12 Comparison of AC bus voltage at receiving terminal

从图 12 的 U_I 曲线最小值来看，有 STATCOM 进行动态无功补偿后，电压最小值由 0.404 324 p.u. 增加到 0.434 154 p.u.，快速算法又把最小值提升到 0.437 940 p.u.，即又增加了 0.003 786 p.u.，显然快速算法能助增 STATCOM 的低电压补偿能力。有 STATCOM 时的电压最大值均小于无动态无功补偿时的最大值 1.148 380 p.u.，说明 STATCOM 没有出现助增过电压现象。快速算法的最大值比单周波算法的最大值小 0.037 260 p.u.，明显大于前面的 0.003 786 p.u.。这说明快速算法在电压由低到高工况要比在电压由高到低工况更有效，这与 1.3 节的分析结果相符。值得注意的是，采用单周波算法的 STATCOM 没有出现助增过电压现象，这与 2.2 节的结论有些偏差。原因在于 2.2 节中的电网模型简单，故障时电压更低，STATCOM 和电网相互作用的关系也简单；另外，3.1 节中有直流输电，有功和无功功率在故障过程中都大幅剧烈波动，STATCOM 和电网相互作用剧烈且复杂。STATCOM 是否出现助增过电压和装置本身的响应特性密切相关，电网特性的影响也不能忽略。因此，应结合具体电网及其工况来综合判定 STATCOM 是否会呈现助增过电压现象。

图 13 为快速算法的 a 相仿真波形。由于并联电感 L_{sc} 的投入，电压 U_I 突降到 0.5 p.u.左右，STATCOM 输出电流由感性快速变为容性 1.2 p.u.，0.1 s 后，并联电感 L_{sc} 退出，电压 U_I 又突升到 1.1 p.u.左右，STATCOM 输出电流由容性 1.2 p.u.快速变为感性。图 13 的仿真结果很好地展示了 STATCOM 的快速响应特性，与此同时，a 相的 16 个 H 桥直流电压均没有发散，都稳定在指令值附近。

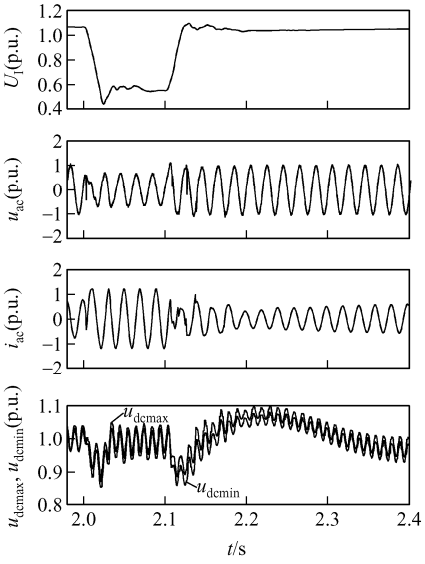


图 13 快速算法的仿真结果

Fig. 13 Simulation results based on fast algorithm

4 结语

提出动态无功补偿装置助增过电压的判据和技术指标。对于 LCC-HVDC 应用场景，STATCOM 助增过电压的现象不严重。鉴于 STATCOM 能够快速准确地跟踪指令电流，因此关键问题为快速估计出交流电压值，基于 SOGI 的快速算法能大幅减少电压值的估算时间。仿真和分析结果均表明，基于 SOGI 的快速算法能够解决 STATCOM 助增过电压问题。

参考文献：

[1] Andersen B, Nilsson S L. Flexible AC Transmission

Systems: FACTS [M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 511-581.

[2] Park J, Yeo S, Choi J. Development of ±400 Mvar world largest MMC STATCOM [C]// 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Jeju, Korea, 2018: 2060-2063.

[3] 王永辉, 宋广磊, 刘冰. 动态无功补偿装置的能力比较[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(5): 18-26.
Wang Yonghui, Song Guanglei, Liu Bing. Capability comparison of dynamic reactive power compensation device [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 18-26. (in Chinese)

[4] 戴朝波, 于弘洋, 赵国亮, 等. STATCOM 和同步调相机响应时间的仿真分析和比较[J]. 南方电网技术, 2023, 17(10): 85-93.
Dai Chaobo, Yu Hongyang, Zhao Guoliang, et al. Simulation analysis and comparison of response times of STATCOM and synchronous condensers [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 85-93. (in Chinese)

[5] Zhang Yi, Gole A M. Comparison of the transient performance of STATCOM and synchronous condenser at HVDC converter stations [C]// 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, 2015: 1-8.

[6] Abele H, John C. Synchronous condensers causing transient instability in a highly stressed grid [C]// ETG Congress 2021. Online, 2021: 1-6.

[7] Stiger A, Rivas R A, Halonen M. Synchronous condensers contribution to inertia and short circuit current in cooperation with STATCOM [C]// 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia). Bangkok, Thailand, 2019: 955-959.

[8] Tzelepis D, Hong Qiteng, Booth C, et al. Enhancing short-circuit level and dynamic reactive power exchange in GB transmission networks under low inertia scenarios [C]// 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Porto, Portugal, 2019: 1-6.

[9] Hadavi S, Phu M S, Bahrani B, et al. Virtual synchronous generator versus synchronous condensers: an electromagnetic transient simulation-based comparison [J]. Cigre Science and Engineering, 2022, 24: 1-20.

[10] Zhang Yichi, Wang Shaowu, Liu Zhaoyan, et al. Applicability analysis of synchronous condenser and STATCOM in frequency and time domains [C]// 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019). Shanghai, China, 2020: 1-7.

[11] 索之闻, 刘建琴, 蒋维勇, 等. 大规模新能源直流外送系统调相机配置研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 124-129.
Suo Zhiwen, Liu Jianqin, Jiang Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 124-129. (in Chinese)

[12] 索之闻, 李晖, 张锋, 等. 高比例新能源直流送端系统分布式调相机优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 133-141.
Suo Zhiwen, Li Hui, Zhang Feng, et al. Optimal configuration of a distributed synchronous condenser for an HVDC sending-end system with a high-proportion of renewable energy [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 133-141. (in Chinese)

[13] 杜维柱, 罗亚洲, 李蕴红, 等. 风电汇集系统无功盈余导致暂态过电压问题的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3224-3238.
Du Weizhu, Luo Yazhou, Li Yunhong, et al. Reviews of transient overvoltage problem cause by extra reactive power in large scale wind power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3224-3238. (in Chinese)

[14] 梁卓航, 时纯, 李岩松, 等. 换相失败下 STATCOM 助增暂态过电压机理与优化策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 66-74.
Liang Zhuohang, Shi Chun, Li Yansong, et al. Mechanism of STATCOM assisting transient voltage under commutation failure at weak sending end system and its optimization strategy [J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 66-74. (in Chinese)

[15] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 静

止同步补偿装置用电压源换流器阀 电气试验: GB/T 41147—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Voltage sourced converter (VSC) valves for static synchronous compensator (STATCOM)—Electrical testing: GB/T 41147—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[16] 肖宇, 黄瑞, 刘谋海, 等. 高精度低计算量的离散锁频环[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 153-162.
Xiao Yu, Huang Rui, Liu Mouhai, et al. High-precision discrete-time frequency-locked loop with low computational cost [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 153-162. (in Chinese)

[17] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems [M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2011.



戴朝波

作者简介：

戴朝波(1972—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授级高级工程师。研究方向：动态无功补偿，灵活交流输电，电力电容器应用。Email：daichaobo@geiri.sgcc.com.cn。

赵国亮(1978—)，男，博士，教授级高级工程师。研究方向：交流柔性输配电。Email：zhaoguoliang@geiri.sgcc.com.cn。

于弘洋(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力电子技术，系统仿真与分析。Email：yuhongyang@geiri.sgcc.com.cn。

杨志昌(1991—)，男，博士。研究方向：电力电子与电力传动。Email：yangzhichang@geiri.sgcc.com.cn。

(责任编辑：郭凯凯)



公益广告来源：阜平县融媒体中心（电视台）