

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.009

构网型无功补偿抑制新能源送端暂态过电压

尚磊¹, 唐王倩云², 苏适³, 张高敏¹, 唐小茜¹, 华祝虎¹

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510700;

3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要: 电网换相换流器型高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)是新能源大规模并网、远距离外送的关键。而直流闭锁、换相失败等故障可能导致送端短时无功过剩并引发暂态过电压, 危及运行安全。文中突破传统基于电压-电流级联控制的电流源外特性快速无功补偿装置的技术原理, 提出一种应用构网型无功补偿装置(grid-forming based reactive power compensation device, GFM-RPC)抑制新能源送端暂态过电压的方法, 构建基于微分-代数关系的电压动态分析模型, 阐明 GFM-RPC 抑制暂态过电压机理, 并分析 GFM-RPC 相比现有基于静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)抑制暂态过电压方法的优势。利用仿真实验验证 GFM-RPC 抑制新能源送端暂态过电压的效果, 并分析主要参数对过电压抑制效果的影响。研究表明, STATCOM 这类电流源外特性的无功补偿装置在直流输电系统故障瞬间呈现出恶化电压动态的“反调”特性, 而 GFM-RPC 能够克服这种“反调”特性, 并且通过合理的参数配置可以进一步抑制电压幅值的超调量。

关键词: 构网型控制; 无功补偿; 新能源发电外送; 直流输电; 暂态过电压; 电压动态

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0083-11

0 引言

在“双碳”目标与能源转型的驱动下, 可再生能源发电装置规模化接入电力系统。以风电、光伏为代表的可再生能源发电装置已成为我国电力系统的重要电力来源^[1-3]。总体上, 我国大规模风电、光伏资源集中于“三北”地区, 电力负荷集中于东部地区, 因而广泛应用高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)技术以减小远距离输电过程中的损耗。现阶段, 电网换相换流器型高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术凭借其建设成本的优势已经在多个直流输电示范工程中实践应用^[4-6]。

然而, 由于移相调制原理的限制, LCC-HVDC 线路换流站运行时所吸收的无功功率大约为线路传输有功功率的 40%~60%, 因此新能源送端换流站需要装设大量的无功补偿装置(如电力电容器)^[7]。一旦直流闭锁、换相失败等故障导致某条直流输电线路退出运行, 电力电容器由于机械开关的时延难以立即退出, LCC-HVDC 送端换流站将会出现大量过剩无功并引发暂态过电压。2011年2月24日的西北电网直流闭锁造成的暂态过电压引起风机脱网达 598 台, 损失有功出力 83.7 万千瓦, 严重威胁

电网安全稳定运行^[8-10]。为避免暂态过电压引起的新能源发电装置大规模脱网, 现有工程常采取将直流线路传输容量限制在额定容量以下的方式^[11-13]。

现阶段, 抑制 LCC-HVDC 送端暂态过电压的方法主要有 2 类。一类是利用风力发电机组换流器吸收过剩的无功, 优势是不需要投入额外的设备。文献[14]基于对送端暂态过电压发展过程的定量分析, 提出了一种双馈异步发电机(doubly fed induction generator, DFIG)转子侧换流器(rotor side converter, RSC)与网侧换流器(grid side converter, GSC)协同控制的风机高压故障穿越策略, 在故障期间向 LCC-HVDC 系统注入合理的无功抑制暂态过电压。在文献[15]中, 电网电压测量环路所引入的时延被证明是暂态过电压的主导因素, 因此将一个附加的信号引入风力发电装置的功率控制环路补偿电压测量环路时延, 从而抑制暂态过电压。尽管这类方法在理论上具有吸收过剩无功并抑制送端过电压的应用潜力, 但是改造成熟的风机控制系统在工程实践上具有一定的困难。另一类是在系统中配置快速无功补偿装置。静止无功补偿器(static var compensator, SVC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)^[16-18]可根据本地电压偏差快速改变无功注入, 从而实现抑制新能源送端暂态过电压。一般来说, SVC 和 STATCOM 的电压-无功动态响应特性会随着电压测量环路的带宽和交流电压控制环路的增益增大而提升, 但带

收稿日期: 2023-10-14; 修回日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007135); 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2021A1515110875)

宽和电压控制环路增益由于稳定运行约束而被限制在一定范围内^[19]。另外,SVC 和 STATCOM 的电力电子多时间尺度级联控制环路不可避免地会引入一定的时延,导致具有电流源外特性的补偿设备无功响应不是即时的。因此,具有电压动态自然支撑能力的电压源外特性补偿装备——同步调相机(synchronous condenser, SC)被尝试应用于抑制送端暂态过电压^[20-21],但由于成本高昂、提升短路电流等问题,应用范围十分有限。

近年来,通过部分或全部模拟同步发电机动态特性的变流器虚拟同步发电机(virtual synchronous generation, VSG)控制技术已被广泛研究与应用^[22-26]。基于 VSG 控制的换流器能够独立构建系统的频率和电压,因而是一种构网型控制技术,其通过虚拟惯量特性能够有效抑制频率快速变化,改善频率动态特性。然而,构网型控制技术用于改善电压动态特性的能力尚未被广泛注意。

为此,文中提出一种应用构网型无功补偿装置(grid-forming based reactive power compensation device, GFM-RPC)抑制新能源送端暂态过电压的方法,GFM-RPC 由储能装置、变流器、构网型控制器组成。与 SVC 和 STATCOM 不同,具有电压源外特性的 GFM-RPC 能够提供即时、自然的无功响应,避免了电压外环-电流内环级联控制环路引入的时延,从而有效抑制新能源送端暂态过电压。首先建立 GFM-RPC 的控制系统模型,并简要分析主要参数对电压动态的影响规律。然后构建基于微分-代数方程的简单系统电压动态分析模型,阐明 GFM-RPC 对于电压动态的改善机理,并分析基于 GFM-RPC 的电压动态改善方法相比现有基于 SVC 或 STATCOM 的电压动态改善方法的优势。最后通过仿真验证了 GFM-RPC 抑制新能源送端暂态过电压的作用。

1 GFM-RPC

1.1 GFM-RPC 的拓扑及控制系统

文中所提 GFM-RPC 的拓扑及控制系统如图 1 所示。GFM-RPC 采用包含有功控制支路和无功控制支路在内的电压矢量控制策略,其中有功控制支路有功参考指令设置为 0。有功控制支路和无功控制支路分别直接控制电压源型换流器(voltage source converter, VSC)内电势的相角和幅值,进而在不需要电流控制环的前提下控制 GFM-RPC 与电网交换的有功及无功功率。其中, U_{dc} 为 VSC 直流侧电容电压值; u_{abc} 、 u_{tabc} 分别为 VSC 输出电压三相瞬

时值和 VSC 并网点电压三相瞬时值; i_{sabc} 为 VSC 输出电流三相瞬时值; X_c 为 VSC 滤波电抗值。脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)模块用于调制 VSC 输出电压三相瞬时值。

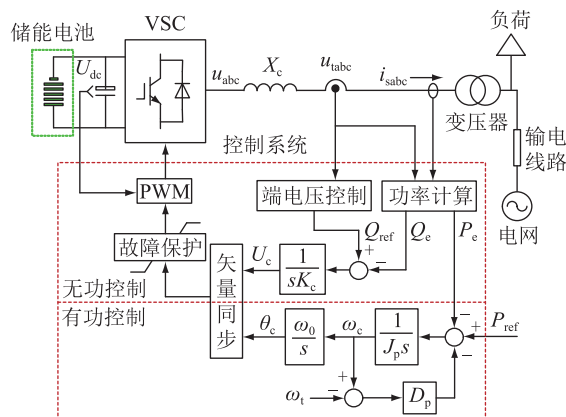


图 1 GFM-RPC 的拓扑及控制系统

Fig.1 The topology and control system of GFM-RPC

有功控制支路的数学表达式为:

$$\begin{cases} \theta_c = \frac{\omega_0}{s} \omega_c \\ \omega_c = \frac{1}{J_p s} [P_{ref} - P_e - D_p(\omega_c - \omega_t)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ_c 为 GFM-RPC 的内电势输出相角; ω_0 为系统额定频率,取值为 50 Hz; ω_c 、 ω_t 分别为 GFM-RPC 的内电势和端电压的角频率; P_{ref} 、 P_e 分别为 GFM-RPC 的有功参考值和有功输出实际值; J_p 、 D_p 分别为 GFM-RPC 的虚拟惯量系数和阻尼系数。

无功控制支路的数学表达式为:

$$U_c = \frac{1}{sK_c} (Q_{ref} - Q_e) \quad (2)$$

式中: U_c 为 GFM-RPC 的内电势幅值; Q_{ref} 、 Q_e 分别为 GFM-RPC 的无功参考值和无功输出实际值; K_c 为 GFM-RPC 的电压刚度系数。

与具有电流源外特性的 STATCOM 不同,GFM-RPC 具有电压源外特性,使得其内电势在扰动下具有保持相对稳定的能力。当电网电压快速变化时,STATCOM 不具备保持内电势相对稳定的能力,如图 2(a)所示。另外,级联控制环路时延带来的“反调”特性使得 STATCOM 不仅不能向系统提供快速无功支撑,反而会短时吸收无功恶化端电压动态,如图 2(b)、(c)所示。而具有电压主动支撑能力的 GFM-RPC 能够在电网扰动发生后保持其内电势相对稳定,并且自然、即时地向系统提供无功支撑以抑制电压快速波动。

1.2 端电压动态特性的主导参数

在 MATLAB/Simulink 中建立图 1 所示的单机

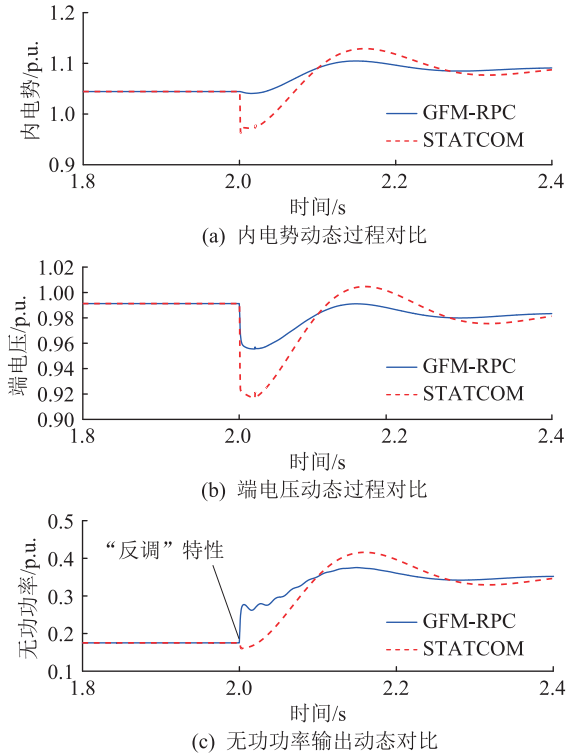


图2 电网电压扰动下 STATCOM 和 GFM-RPC 的内电势、端电压及无功动态响应

Fig.2 The inner potential, terminal voltage and reactive power dynamic response of STATCOM and GFM-RPC under grid voltage disturbance

无穷大系统以研究主要参数对端电压动态特性的影响规律。

保持 GFM-RPC 的电压刚度系数 K_c 不变,在 2 s 时设置无功负荷从 0 跳变至 0.4 p.u.,如图 3 所示,随着滤波电抗 X_c 的减小,GFM-RPC 提供的无功功率增大,而端电压的波动随之减小。

保持滤波电抗 X_c 不变,在 2 s 时设置无功负荷从 0 跳变至 0.4 p.u.,如图 4 所示,随着电压刚度系数 K_c 增大,GFM-RPC 在扰动发生瞬间提供的无功功率幅值不变,端电压和无功功率的波动减小。

2 含 GFM-RPC 的系统暂态过电压建模与分析

2.1 用于电压动态分析的简化电力系统

文中采用图 5 所示的简化电力系统研究 GFM-RPC 对于暂态过电压动态的影响。GFM-RPC 和恒定负荷连接在并网点母线上,并网点母线通过输电线路连接至无穷大电网。端电压 U_t 通过 GFM-RPC 的交流电压及功率控制环路实现调节。图 5 中, I_L 、 I_g 、 I_s 分别为流入负荷的电流、电网输出电流以及 GFM-RPC 输出电流; U_g 、 X_g 分别为电网电压幅值和输电线路电抗。

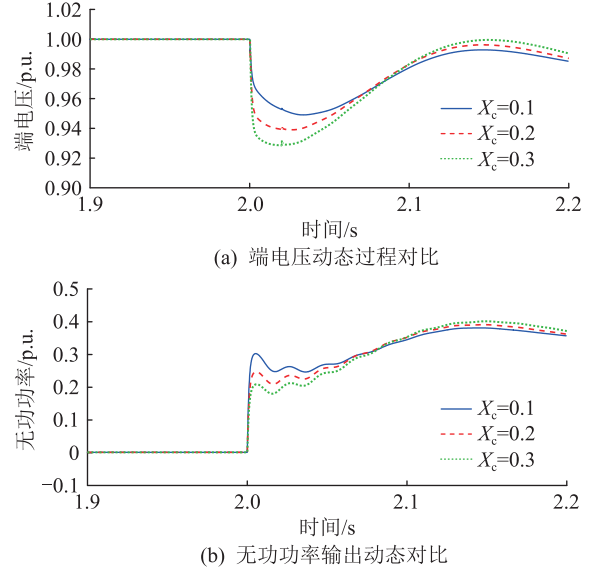


图3 不同滤波电抗 X_c 下的端电压动态与 GFM-RPC 无功响应

Fig.3 The terminal voltage dynamics and the reactive power response of GFM-RPC with different filter impedances

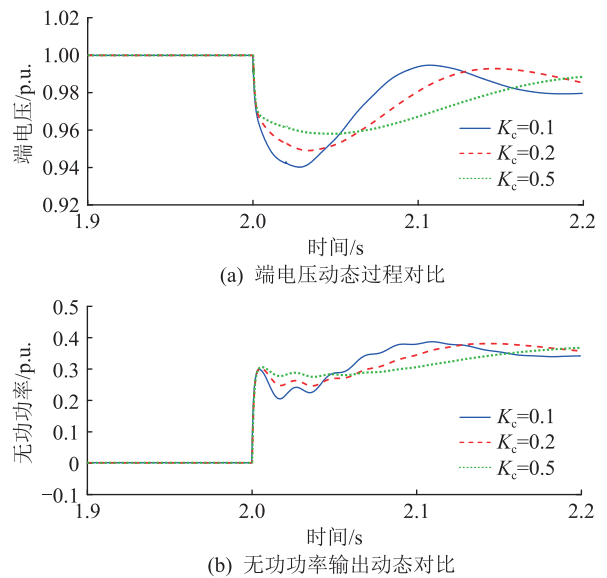


图4 不同电压刚度系数 K_c 下的端电压动态与 GFM-RPC 无功响应

Fig.4 The terminal voltage dynamics and the reactive power response of GFM-RPC with different voltage resilience coefficients

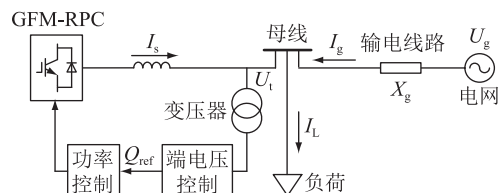


图5 用于暂态过电压动态分析的简化电力系统
Fig.5 Simplified power system for dynamic analysis of transient overvoltage

交流电压控制环路的数学表达式为:

$$G_{ac} = \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3)$$

式中: G_{ac} 为交流电压控制环路的传递函数; K_A 、 T_A 分别为交流电压控制的增益系数和时间常数。

系统中的电流可以表示为:

$$\begin{cases} I_L = I_g + I_s \\ I_g = (U_g - U_t)/X_g \end{cases} \quad (4)$$

系统中的有功、无功功率可以表示为:

$$\begin{cases} P_L = P_e + P_g \\ Q_L = Q_e + Q_g \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_L 、 Q_L 分别为流入负荷的有功、无功功率; P_g 、 Q_g 分别为电网输出有功、无功功率。

P_g 和 Q_g 可以表示为:

$$\begin{cases} P_g = U_t U_g \sin(\theta_g - \theta_t)/X_g \\ Q_g = (U_t U_g \cos(\theta_g - \theta_t) - U_t^2)/X_g \end{cases} \quad (6)$$

式中: θ_g 、 θ_t 分别为电网电压和端电压的相角。

P_e 和 Q_e 可以表示为:

$$\begin{cases} P_e = U_t U_c \sin(\theta_c - \theta_t)/X_c \\ Q_e = (U_t U_c \cos(\theta_c - \theta_t) - U_t^2)/X_c \end{cases} \quad (7)$$

2.2 含 GFM-RPC 的系统电压动态线性化分析模型

稳态时,GFM-RPC 的输出有功功率为 0,即:

$$\begin{cases} \theta_{c0} = \theta_{t0} \\ \sin(\theta_{c0} - \theta_{t0}) = 0 \\ \cos(\theta_{c0} - \theta_{t0}) = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: θ_{c0} 、 θ_{t0} 分别为 GFM-RPC 的内电势输出相角初值和端电压相角初值。

扰动下,无功功率的变化量可以表示为:

$$\Delta Q_L = \Delta Q_e + \Delta Q_g \quad (9)$$

其中:

$$\begin{cases} \Delta Q_e = \frac{U_{c0} - 2U_{t0}}{X_c} \Delta U_t + \frac{U_{t0}}{X_c} \Delta U_c \\ \Delta Q_g = \frac{U_{g0} \cos(\theta_{g0} - \theta_{t0}) - 2U_{t0}}{X_g} \Delta U_t + \frac{U_{t0} U_{g0} \sin(\theta_{g0} - \theta_{t0})}{X_g} \Delta \theta_t \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{c0} 、 U_{t0} 分别为 GFM-RPC 内电势幅值初值和端电压幅值初值; U_{g0} 、 θ_{g0} 分别为电网电压幅值初值和相角初值; ΔU_c 、 ΔU_t 分别为内电势幅值变化量和端电压幅值变化量; $\Delta \theta_t$ 为端电压相角变化量。

GFM-RPC 和电网的输出有功变化量可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_e = \frac{U_{c0} U_{t0}}{X_c} (\Delta \theta_c - \Delta \theta_t) \\ \Delta P_g = \frac{U_{g0} \sin(\theta_{g0} - \theta_{t0})}{X_g} \Delta U_t - \frac{U_{t0} U_{g0} \cos(\theta_{g0} - \theta_{t0})}{X_g} \Delta \theta_t \end{cases} \quad (11)$$

GFM-RPC 的内电势幅值及相角变化量为:

$$\begin{cases} \Delta U_c = \frac{1}{sK_c} (\Delta Q_{ref} - \Delta Q_e) \\ \Delta \theta_c = \frac{\omega_0}{J_p s} \left(\Delta P_{ref} - \Delta P_e - D_p \frac{s}{\omega_0} \Delta \theta_c + D_p \frac{s}{\omega_0} \Delta \theta_t \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: ΔP_{ref} 、 ΔQ_{ref} 分别为有功、无功输出参考值变化量。

将式(12)代入(11)可得:

$$\Delta P_e = \frac{-J_p U_{t0} U_{c0} s^2}{J_p X_c s^2 + X_c D_p s + U_{t0} U_{c0} \omega_0} \Delta \theta_t \quad (13)$$

假设负荷类型为恒阻抗负荷,随着端电压的变化,负荷有功功率变化可以表示为:

$$\Delta P_L = \Delta P_e + \Delta P_g = \frac{2U_{t0}}{R} \Delta U_t \quad (14)$$

式中: R 为输电线路电阻值。

将式(11)代入(14)可得:

$$\Delta \theta_t = \left[\left(\frac{2U_{t0}}{R} - \frac{U_{g0} \sin(\theta_{g0} - \theta_{t0})}{X_g} \right) \Delta U_t - \Delta P_e \right] \times \frac{-X_g}{U_{t0} U_{g0} \cos(\theta_{g0} - \theta_{t0})} \quad (15)$$

将式(8)一式(15)线性化,可得含 GFM-RPC 的系统电压动态线性化分析模型,其传递函数框图如图 6 所示。其中,参数 K_{11} 、 K_{12} 以及传递函数 $G_{11}(s)$ 可以表示为:

$$\begin{cases} K_{11} = \frac{2U_{t0}}{R} - \frac{U_{g0} \sin(\theta_{g0} - \theta_{t0})}{X_g} \\ K_{12} = \frac{-X_g}{U_{t0} U_{g0} \cos(\theta_{g0} - \theta_{t0})} \end{cases} \quad (16)$$

$$G_{11}(s) = \frac{-J_p U_{t0} U_{c0} s^2}{J_p X_c s^2 + X_c D_p s + U_{t0} U_{c0} \omega_0} \quad (17)$$

图 6 中, ΔU_{ref} 为交流电压控制参考值变化量,在文中所关注的电压动态过程中 ΔU_{ref} 忽略不计;支路 1 为负荷无功变化引起母线电压变化的路径,与系统有功运行点和传输线路阻抗有关;支路 2 为母线电压变化引起 GFM-RPC 无延时自然无功响应的路径;支路 3 为 GFM-RPC 无功功率控制的作用路径;支路 4 为交流电压控制的作用路径;支路 5 为母

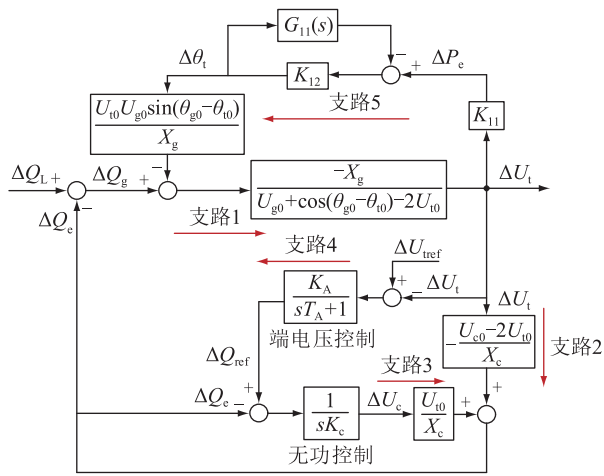


图6 含GFM-RPC的系统电压动态线性化分析模型

Fig.6 Linearized voltage dynamic model of system with GFM-RPC

线电压幅值通过影响母线电压相位间接影响电网输出无功功率的作用路径,与系统有功运行点、线路阻抗、GFM-RPC有功控制参数等因素有关。

在MATLAB/Simulink仿真软件中对上述电压动态线性化分析模型和图5所示电压分析系统的全阶仿真模型进行无功扰动仿真实验,仿真结果如图7所示。所提分析模型的仿真结果与全阶仿真模型的运行结果具有较高的拟合性,因此该分析模型对于系统在外界无功扰动时的电压动态特性分析具有较高的可参考度。

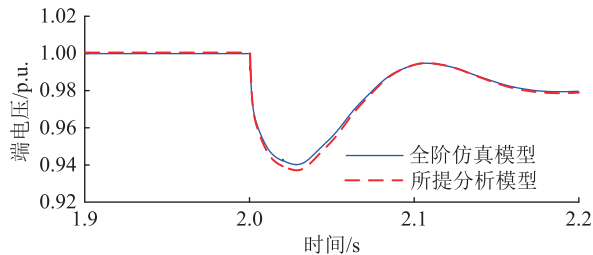


图7 所提电压动态分析模型的验证

Fig.7 Validation of the proposed voltage dynamic analysis model

对图6所示模型中支路5的传递函数做伯德图分析,结果如图8所示,支路5增益不超过-15 dB。这说明母线电压幅值通过影响母线电压相位间接影响电网输出无功功率的作用效果很小,可以忽略。

2.3 GFM-RPC作用下系统电压变化过程分析与讨论

根据图6所示模型,结合图5的电压分析系统仿真模型,将受到扰动时,GFM-RPC作用下系统电压变化过程分为如下3个阶段。

阶段1:自然响应阶段,从受到外界无功扰动到无功控制生效。

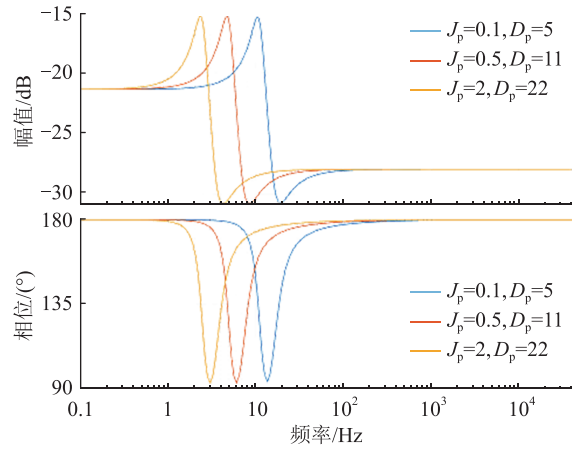


图8 支路5的传递函数伯德图

Fig.8 The bode diagram of branch 5

阶段2:回归阶段,无功控制生效到交流电压控制生效。

阶段3:补偿阶段,交流电压控制下电压恢复。

在仿真中设置GFM-RPC无功控制前不加交流电压控制,在2 s时负荷无功从消耗0.2 p.u.增至0.4 p.u.,对照组使用一恒定无功功率源代替GFM-RPC,输出功率与GFM-RPC初始值一致。

阶段1的变化主要受图6所示模型中支路1和支路2的影响,支路1只与传输线路阻抗和系统有功运行点有关。对于GFM-RPC,支路2的增益为 $(U_{c0}-2U_{t0})/X_c$,符号为负, X_c 较小,一般约为0.1 p.u.甚至更小,因此支路2的增益较大,约为10。当端电压在外界无功干扰下下降时,即 $\Delta U_t < 0$,通过支路2中GFM-RPC产生的自然无功响应为正, $\Delta Q_c > 0$,如图9(b)所示,抑制电压下降。类似地,当端电压上升时,GFM-RPC将产生负的自然无功响应,抑制电压升高。因此,当无功扰动引发系统电压变化时,GFM-RPC的电压刚度特性会使其被动产生正调性质的无功响应,达到抑制电压变化、为系统提供电压支撑的目的。图9(a)中,GFM-RPC端电压下降的幅度远小于对照组,这表明在外界无功扰动下,GFM-RPC产生的正调性质的自然无功响应可以在第一时间很大程度地抑制电压变化。

阶段2时受到支路3补偿器无功控制的影响,自然响应过后,在无功控制的作用下,GFM-RPC输出的无功功率从自然响应向无功参考值(无功初始值)回归,如图9(b)所示,端电压也随之回归,如图9(a)所示。

阶段3,在交流电压控制的作用下,阶段2的回归过程被截断,GFM-RPC无功参考值在交流电压控制下变化,端电压下降的情况下,无功参考值被调高,GFM-RPC输出无功功率上升,端电压随之上升,

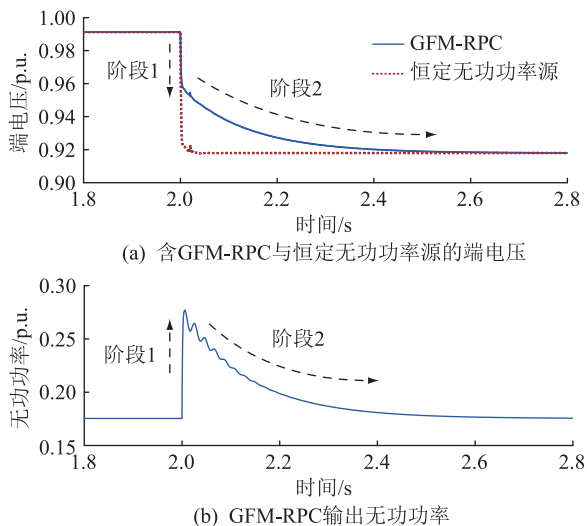


图9 阶段1、2中端电压动态以及GFM-RPC输出无功功率的仿真结果

Fig.9 The simulation results of the terminal voltage dynamics and the reactive power output by GFM-RPC in stage 1 and 2

如图10所示。

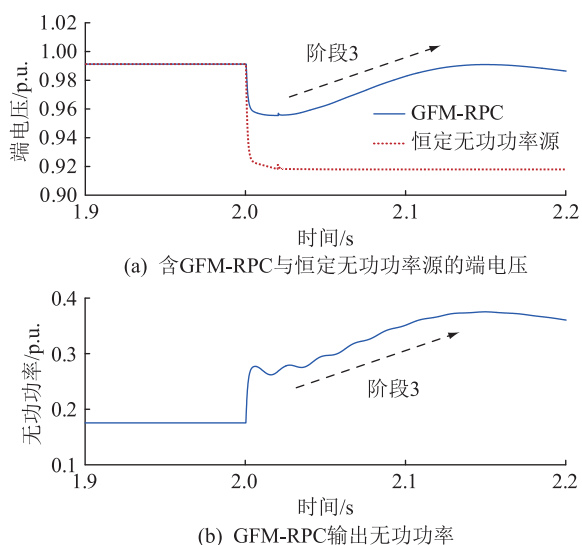


图10 阶段3中端电压动态以及GFM-RPC输出无功功率的仿真结果

Fig.10 The simulation results of the terminal voltage dynamics and the reactive power output by GFM-RPC in stage 3

总结 GFM-RPC 作用下系统电压在外界无功干扰下发展的整个过程。在系统电压变化时, GFM-RPC 由于其自身的电压刚度特性会主动地产生正调性质的自然无功响应, 在第一时间抑制系统电压的变化, 随后在交流电压控制和无功控制作用下, GFM-RPC 进一步产生更多的无功输出从而恢复电压水平。GFM-RPC 自身的电压刚度特性在系统电压受到扰动, 尤其是快速扰动时, 可以为系统提供电压支撑, 平抑电压变化。

3 仿真案例

3.1 仿真系统描述

为验证第2章中构建的电压动态线性化分析模型的正确性, 在 MATLAB/Simulink 仿真软件中搭建特高压直流输电送端系统网架拓扑, 如图11所示。汇集站 A、B、C、D 均接有大规模全功率风电机组, 各站线路距离如图11所示, 其中 A 站装机 4 000 MW、B 站装机 6 000 MW、C 站和 D 站装机各 2 000 MW, 交流系统主网电压等级为 750 kV。全功率风电机组依次经 690 V、35 kV、110 kV、330 kV、750 kV 层级升压接入主网, 直流换流站两回输电, 每回直流输电额定直流电压为 ± 800 kV, 每回直流额定容量为 4 000 MW, 直流总输电容量为 8 000 MW。文中通过 GFM-RPC 对直流闭锁暂态过电压进行抑制实验。风电场 110 kV 母线处装设了静止无功发生器 (static var generator, SVG)。

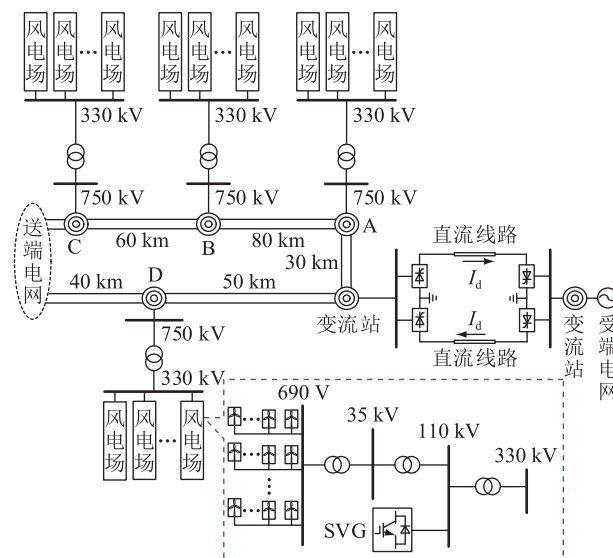


图11 GFM-RPC对LCC-HVDC送端暂态过电压影响的简化分析系统

Fig.11 Simplified analysis system for effect of GFM-RPC on the transient overvoltage at sending area of LCC-HVDC

3.2 STATCOM与GFM-RPC抑制直流闭锁暂态过电压的效果对比

选取3个暂态过电压情况较严重的汇集站 A、B、D, 在各站 110 kV 电压等级线路处装设占各站风机容量 1/3 的 GFM-RPC 或 STATCOM, 进行 3 组直流单极闭锁实验。实验组一: 各站装设 GFM-RPC; 实验组二: 各站装设 STATCOM; 实验组三: 各站不装设任何类型的补偿器。

以汇集站 A 为例, 不同补偿类型下 A 站机端暂态过电压以及各类型补偿器无功输出情况如图 12

和图 13 所示。可见 GFM-RPC 的补偿效果整体优于 STATCOM,无功响应更加匹配电压动态过程。STATCOM 由于其无功响应不及时,反而在暂态过电压结束时出现了低电压的现象,加剧了整体电压波动范围。B、D 两站情况类似。

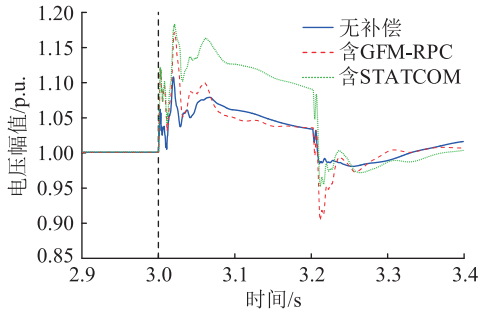


图 12 配置 GFM-RPC 和 STATCOM 的系统暂态过电压对比

Fig.12 Comparison of the transient overvoltage in the system with GFM-RPC and STATCOM

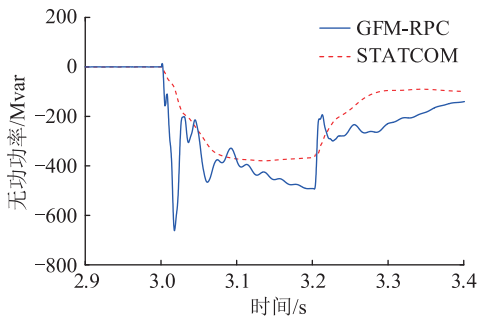


图 13 GFM-RPC 和 STATCOM 的无功响应
Fig.13 Reactive power response of GFM-RPC and STATCOM

不同补偿类型作用下,各站机端暂态过电压情况如表 1 所示。

表 1 不同补偿类型的过电压抑制效果

Table 1 Overvoltage suppression effect of different compensation types

补偿类型	电压变化范围/p.u.		
	汇集站 A	汇集站 B	汇集站 D
含 GFM-RPC	[0.97,1.11]	[0.99,1.05]	[0.98,1.07]
含 STATCOM	[0.90,1.17]	[0.95,1.09]	[0.94,1.12]
无补偿	[0.95,1.18]	[0.98,1.11]	[0.97,1.14]

3.3 GFM-RPC 装机容量对于暂态过电压的影响

依旧选取 3 个暂态过电压情况较严重的汇集站 A、B、D,在各站 110 kV 电压等级线路处装设占各站风机容量不同比例的 GFM-RPC,进行 3 组直流单极闭锁实验。实验组一:各站装设相当于各站风电装机容量 1/3 的 GFM-RPC;实验组二:各站装设相当于各站风电装机容量 1/5 的 GFM-RPC;实验组三:

各站装设相当于各站风电装机容量 1/8 的 GFM-RPC。

以汇集站 A 为例,不同 GFM-RPC 装机容量下 A 站机端暂态过电压以及 GFM-RPC 输出无功情况如图 14 和图 15 所示,可见 GFM-RPC 容量的增加可以显著增强暂态过电压抑制效果。B、D 两站情况类似。

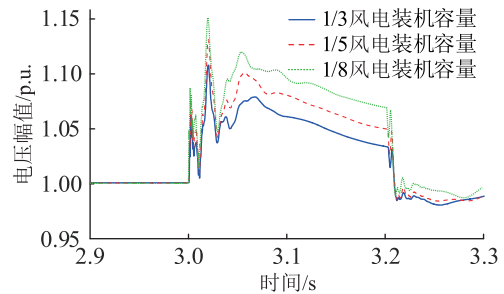


图 14 不同 GFM-RPC 装机容量下暂态过电压对比
Fig.14 Comparison of transient overvoltage with different installed capacities of GFM-RPC

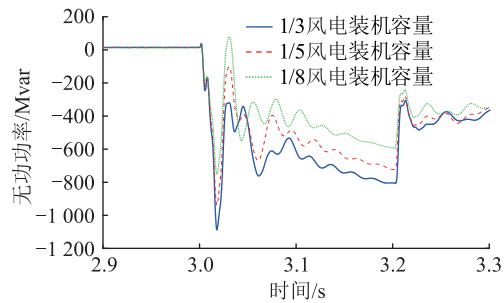


图 15 不同 GFM-RPC 装机容量下的无功响应
Fig.15 Reactive power response with different installed capacities of GFM-RPC

不同 GFM-RPC 装机容量作用下,各站风电机组暂态过电压情况如表 2 所示。

表 2 不同 GFM-RPC 装机容量下各站机端过电压

Table 2 Overvoltage on each station with different installed capacities of GFM-RPC

GFM-RPC 装机容量	电压幅值/p.u.		
	汇集站 A	汇集站 B	汇集站 D
1/3 风电装机	1.108	1.051	1.074
1/5 风电装机	1.131	1.065	1.096
1/8 风电装机	1.152	1.077	1.110

3.4 GFM-RPC 装设位置对于暂态过电压的影响

同样选取过电压情况较为严重的 A、B、D 汇集站,在每个汇集站装设相当于各站风电装机容量 1/3 的 GFM-RPC,进行 3 组单极闭锁实验。实验组一:各站 GFM-RPC 装设于 110 kV 电压等级线路处;实验组二:各站 GFM-RPC 装设于 330 kV 电压等级线路处;实验组三:各站 GFM-RPC 装设于 750 kV 电压

等级线路处。

以汇集站 A 为例,不同电压等级 GFM-RPC 装设位置下 A 站机端暂态过电压以及 GFM-RPC 输出无功情况如图 16 和图 17 所示。可见 GFM-RPC 装设于 110 kV 电压等级线路处用最小输出无功量取得了暂态过电压最好的抑制效果,装设于 330 kV 电压等级线路处的效果次之。可以得出结论,在低电压等级线路处装设 GFM-RPC 对风电机端暂态过电压的抑制效果优于在高电压等级处装设 GFM-RPC。B、D 两站情况类似。

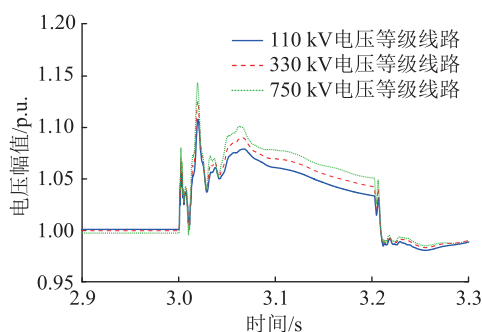


图 16 GFM-RPC 配置在不同位置的暂态过电压对比

Fig.16 Comparison of transient overvoltage of the GFM-RPC at different locations

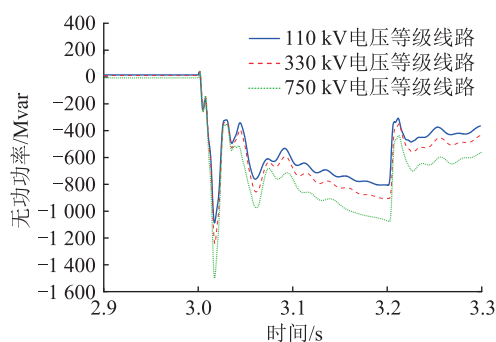


图 17 GFM-RPC 配置在不同位置的无功响应

Fig.17 Reactive power response of the GFM-RPC at different locations

不同 GFM-RPC 装设位置下,各站风电机端暂态过电压情况如表 3 所示。

表 3 不同 GFM-RPC 装设位置下各站机端过电压

Table 3 Overvoltage on each station with different locations of GFM-RPC

GFM-RPC 装设位置	电压幅值/p.u.		
	汇集站 A	汇集站 B	汇集站 D
110 kV 电压 等级线路	1.108	1.051	1.074
330 kV 电压 等级线路	1.125	1.059	1.088
750 kV 电压 等级线路	1.144	1.064	1.103

3.5 GFM-RPC 功率控制参数对于暂态过电压的影响

首先研究有功控制参数的影响。选取暂态过电压情况较严重的汇集站 A、B、D,在各站 110 kV 电压等级线路处装设占各站风电装机容量 1/3 的 GFM-RPC,进行 3 组直流单极闭锁实验。实验组一:GFM-RPC 有功控制参数(J_p, D_p)设为(0.1,5);实验组二:GFM-RPC 有功控制参数(J_p, D_p)设为(0.5,25);实验组三:GFM-RPC 有功控制参数(J_p, D_p)设为(1,50)。3 个实验组中 GFM-RPC 无功控制参数 K_c 均设为 0.5。

以汇集站 A 为例,不同 GFM-RPC 有功控制参数下 A 站机端暂态过电压以及 GFM-RPC 输出无功情况如图 18 和图 19 所示。可见有功控制参数的改变对 A 站机端暂态过电压的影响较小。B、D 两站情况类似。

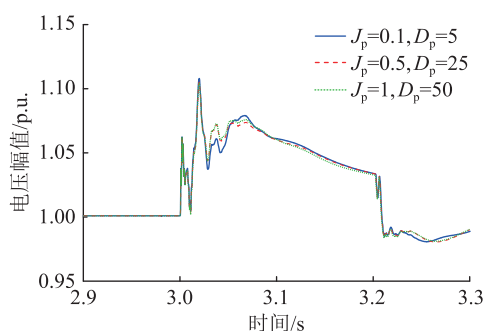


图 18 不同 GFM-RPC 有功控制参数下的暂态过电压对比

Fig.18 Comparison of transient overvoltage with different active power control parameters of GFM-RPC

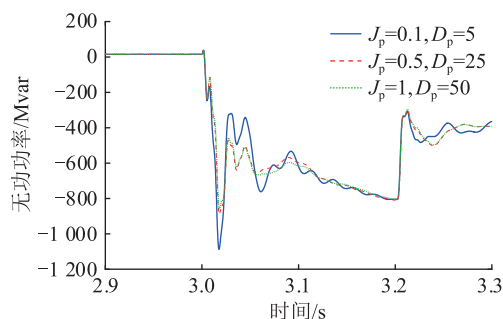


图 19 不同 GFM-RPC 有功控制参数下的无功响应

Fig.19 Reactive power response with different active power control parameters of GFM-RPC

不同 GFM-RPC 有功控制参数下各站风电机端暂态过电压如表 4 所示。

然后研究无功控制参数的影响。依旧选取汇集站 A、B、D,在各站 110 kV 电压等级线路处装设占各站风电装机容量 1/3 的 GFM-RPC,进行 3 组直

表4 不同 GFM-RPC 有功控制参数下各站机端过电压

Table 4 Overvoltage on each station with different active power control parameters of GFM-RPC

(J_p, D_p)	电压幅值/p.u.		
	汇集站 A	汇集站 B	汇集站 D
(0.1, 5)	1.108	1.051	1.074
(0.5, 25)	1.105	1.049	1.072
(1, 50)	1.104	1.049	1.071

流单极闭锁实验。实验组一:GFM-RPC 无功控制参数 K_c 设为 0.5;实验组二:GFM-RPC 无功控制参数 K_c 设为 1.0;实验组三:GFM-RPC 无功控制参数 K_c 设为 2.0。3 个实验组中 GFM-RPC 有功控制参数 (J_p, D_p) 均设为(0.1, 5)。

以汇集站 A 为例,不同 GFM-RPC 无功控制参数下 A 站机端暂态过电压以及 GFM-RPC 输出无功情况如图 20 和图 21 所示。可见在一定范围内,越小的刚度系数 K_c 使 GFM-RPC 无功控制增益越大,在过电压发展后期无功响应速度更快,过电压受到更大程度的抑制。但在另一方面,刚度系数 K_c 减小了 GFM-RPC 的电压刚度特性,由图 20 可知,刚度系数 K_c 越小,暂态过电压的波动范围越大。B、D 两站情况类似。

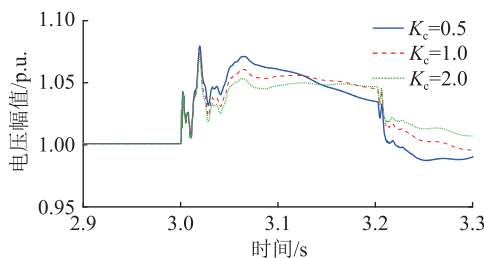


图 20 不同 GFM-RPC 无功控制参数下的暂态过电压对比

Fig.20 Comparison of transient overvoltage with different reactive power control parameters of GFM-RPC

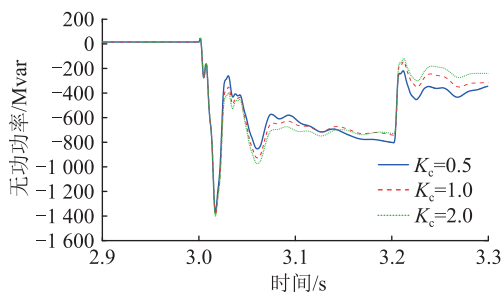


图 21 不同 GFM-RPC 无功控制参数下的无功响应

Fig.21 Reactive power response with different parameters of GFM-RPC

不同 GFM-RPC 无功控制参数下各站风电机端暂态过电压变化范围如表 5 所示。

表5 不同 GFM-RPC 无功控制参数下各站机端电压变化范围

Table 5 Voltage range of each station with different reactive power control parameters of GFM-RPC

K_c	电压变化范围/p.u.		
	汇集站 A	汇集站 B	汇集站 D
0.5	[0.981, 1.108]	[0.992, 1.051]	[0.987, 1.074]
1.0	[0.991, 1.104]	[0.997, 1.049]	[0.994, 1.072]
2.0	[1.000, 1.103]	[1.002, 1.048]	[1.001, 1.070]

4 结语

文中提出一种应用 GFM-RPC 抑制新能源送端暂态过电压的方法。基于微分-代数方程构建了含 GFM-RPC 的系统电压多阶段分析模型,厘清了新能源送出系统动态过程中的无功-电压多阶段演化关系,揭示了构网型无功补偿控制对于电压幅值的瞬时支撑原理及电压动态改善机理。并利用大规模风电经 LCC-HVDC 送出的暂态过电压抑制仿真,对比了 GFM-RPC 和传统跟网型无功补偿装置 STATCOM 在电压动态改善方面的作用。结果表明, GFM-RPC 借助其功率瞬时响应与内电势支撑特性可有效抑制直流闭锁瞬间的暂态过电压幅值,而 STATCOM 难以实现快时间尺度的电压动态控制。另外,仿真研究分析了 GFM-RPC 容量、装设位置、功率控制参数等因素对电压动态改善的影响,可指导后续 GFM-RPC 的实际工程应用与参数设计。

最后,在现有实际工程中,SC 被广泛应用于解决新能源送端暂态过电压的问题,然而大型旋转设备的维护及挂网损耗增大了系统运行成本,文中所提构网型无功补偿方案与现有 SC 方案在技术经济性、工程适用性方面的对比是后续研究所考虑的重点。

参考文献:

- [1] 李文竹,寇汉鹏. 考虑暂态过电压抑制的新能源送出型电网无功优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2023(6): 117-125.
LI Wenzhu, KOU Hanpeng. Reactive power optimization method of new energy outgoing grid considering transient overvoltage suppression[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(6): 117-125.
- [2] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 尚磊,董旭柱,刘超. 惯量-刚度补偿器增强接入弱电网风电场直流电压时间尺度小于扰稳定的作用机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(7): 2321-2331.

- SHANG Lei, DONG Xuzhu, LIU Chao. Mechanism analysis of stability improvement of wind farm connected into weak grid by inertia-stiffness compensator in DC-link voltage time scale[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(7):2321-2331.
- [4] MIRSAEIDI S, DONG X Z, SAID D M. A fault current limiting approach for commutation failure prevention in LCC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5):2018-2027.
- [5] 王梓懿, 肖华锋, 高博, 等. 考虑故障状态的 LCC-HVDC 建模方法研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(5):78-86.
- WANG Ziyi, XIAO Huafeng, GAO Bo, et al. Modeling method of LCC-HVDC considering fault state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(5):78-86.
- [6] 王秋楠, 晋宏杨, 刘东, 等. LCC-HVDC 换流站无功电压控制问题综述[J]. 电力电容器与无功补偿, 2023, 44(2):10-17.
- WANG Qiunan, JIN Hongyang, LIU Dong, et al. Review on reactive voltage control of LCC-HVDC converter station[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2):10-17.
- [7] 赵成勇, 郭春义, 刘文静. 混合直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- ZHAO Chengyong, GUO Chunyi, LIU Wenjing. Hybrid high voltage direct current transmission system[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [8] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术, 2012, 36(10):76-80.
- SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in Northwest China power grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10):76-80.
- [9] 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):3224-3239.
- 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):3224-3239.
- [10] 吕哲, 葛怀畅, 郭庆来, 等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22):8041-8053.
- LYU Zhe, GE Huaichang, GUO Qinglai, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving-end grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22):8041-8053.
- [11] YIN C Y, LI F T. Reactive power control strategy for inhibiting transient overvoltage caused by commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5):4764-4777.
- [12] 周莹坤, 谢恒, 孙华东, 等. 新能源机组低电压穿越控制参数对机端工频过电压的影响[J]. 电网技术, 2022, 46(5):1907-1916.
- ZHOU Yingkun, XIE Heng, SUN Huadong, et al. Influence of renewable energy low voltage ride-through control parameters on overvoltage[J]. Power System Technology, 2022, 46(5):1907-1916.
- [13] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14):4777-4786.
- SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. Effect of the low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14):4777-4786.
- [14] JIN X, NIAN H, ZHAO C, et al. Optimal power coordinated control strategy for DFIG-based wind farm to increase transmission capacity of the LCC-HVDC system considering commutation failure[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(3):3129-3139.
- [15] JIN X, NIAN H. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVDC system under commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(9):10265-10277.
- [16] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4):1-7.
- ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4):1-7.
- [17] 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.
- [18] 任丕德, 刘发友, 周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术, 2004, 28(23):81-83.
- REN Pide, LIU Fayou, ZHOU Shengjun. Application status of dynamic reactive power compensation technology[J]. Power System Technology, 2004, 28(23):81-83.
- [19] LIU J, JIANG R R, LIU Q, et al. Study on transient overvoltage of wind farm caused by fault of HVDC system and its suppression measures[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China. IEEE, 2018:1-6.
- [20] HUANG S H, SCHMALL J, CONTO J, et al. Voltage control challenges on weak grids with high penetration of wind generation: ERCOT experience[C]//2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA, USA. IEEE, 2012:1-7.
- [21] TELEKE S, ABDULAHOVIC T, THIRINGER T, et al. Dynamic performance comparison of synchronous condenser and SVC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(3):1606-1612.
- [22] MENDIS N, MUTTAQI K M, PERERA S. Management of battery-supercapacitor hybrid energy storage and synchronous condenser for isolated operation of PMSG based variable-speed wind turbine generating systems[J]. IEEE Transactions on

- Smart Grid, 2014, 5(2):944-953.
- [23] ZHONG Q C, NGUYEN P L, MA Z Y, et al. Self-synchronized synchronverters: inverters without a dedicated synchronization unit[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2):617-630.
- [24] 尚磊, 胡家兵, 袁小明, 等. 电网对称故障下虚拟同步发电机建模与改进控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2):403-412.
- SHANG Lei, HU Jiabing, YUAN Xiaoming, et al. Modeling and improved control of virtual synchronous generators under symmetrical faults of grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2):403-412.
- [25] 石荣亮, 兰才华, 王国斌, 等. 基于有功前馈补偿的储能VSG并网有功振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14):118-126.
- SHI Rongliang, LAN Caihua, WANG Guobin, et al. Grid-connected active power oscillation suppression strategy of an energy storage VSG based on active power feed-forward compensation[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14):118-126.
- [26] 丁一凡, 季亮, 常潇, 等. 不对称电压跌落下虚拟同步机改进低电压穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16):76-85.
- DING Yifan, JI Liang, CHANG Xiao, et al. Improved low voltage ride-through control strategy of a virtual synchronous generator during unbalanced voltage sags[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16):76-85.

作者简介:



尚磊

尚磊(1986),男,博士,副教授,研究方向为电力电子化电力系统频率/电压分析与优化控制技术、能源互联网技术等(E-mail: shanglei@whu.edu.cn);

唐王倩云(1992),女,博士,高级工程师,从事新能源并网系统稳定与控制工作;

苏适(1972),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为新能源并网控制、微网和电力系统自动化。

Suppression of transient overvoltage in renewable energy transmission terminal by grid-forming based reactive power compensation

SHANG Lei¹, TANG Wangqianyun², SU Shi³, ZHANG Gaomin¹, TANG Xiaoqian¹, HUA Zhuhu¹

(1. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510700, China;

3. CSG Yunnan Electric Power Research Institute, Kunming 650217, China)

Abstract: Line commutated converter based high voltage direct current (LCC-HVDC) is the key to large-scale grid connection and long-distance transmission of renewable energy. However, faults such as DC blocking and commutation failure may lead to short-term excess reactive power and transient overvoltage at the sending end, endangering operational safety. In this paper, a method based on grid-forming based reactive power compensation device (GFM-RPC) to suppress transient overvoltage at the renewable energy transmission terminal is proposed, which is different from the traditional reactive power compensation with the characteristic of current source based on voltage-current cascade control. A voltage dynamic analysis model based on differential-algebraic relationship is constructed to clarify the mechanism of GFM-RPC suppressing transient overvoltage, and the advantages of the proposed method compared to existing methods based on static synchronous compensator (STATCOM) for suppressing transient overvoltage is compared and analyzed. The simulation is used to verify the effect of GFM-RPC on the suppression of transient overvoltage at the renewable energy transmission terminal, and the influence of the main parameters on the overvoltage suppression effect is analyzed. It is shown that reactive power compensation devices such as STATCOM with external characteristics of current sources exhibit a reverse regulation characteristic of deteriorating voltage dynamics at the moment of DC transmission system fault, while the reverse regulation characteristic can be eliminated by GFM-RPC, as well as suppression of voltage magnitude overshoot can be achieved through reasonable parameter configuration for GFM-RPC.

Keywords: grid-forming control; reactive power compensation; renewable energy generation transmission; DC transmission; transient overvoltage; voltage dynamics

(编辑 陆海霞)