

高比例新能源接入下送端电网直流闭锁过电压分析与抑制策略

史华勃¹, 丁理杰¹, 焦浩然², 金萧², 年珩²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:近年来,以风电和光伏为主的可再生能源发电技术发展迅速。考虑到可再生能源资源富集区域和重负荷区域之间存在空间上的分布差异,高压直流输电被证明是一种能够有效将电力进行远距离传输以提升可再生能源消纳的技术。高压直流输电系统的直流闭锁故障,特别是直流双极闭锁故障,会导致送受端交流电网中产生过电压浪涌,进而可能导致发电机脱网运行。文中建立了直流闭锁故障下送端交流电网中过电压的数学模型,分析了可再生能源发电设备的无功功率对直流闭锁下电网过电压的影响,进而以送端电网的无功功率裕度最大为目标提出了一种最优有功出力分配策略。基于 Matlab/Simulink,设计了一个案例来验证所提出的最优有功出力分配策略减少直流闭锁下电网过电压的有效性。

关键词:可再生能源发电;高压直流输电;最优出力分配;过电压抑制;直流闭锁

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0022-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230204

Overvoltage Analysis and Suppression Strategy of Sending AC Grid with High Renewable Energy Penetration under DC Blocking

SHI Huabo¹, DING Lijie¹, JIAO Haoran², JIN Xiao², NIAN Heng²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: Renewable energy power generation technologies dominated by wind power and photovoltaics have grown rapidly in recent years. Considering the spatial distance between renewable energy-rich areas and heavy loaded areas, high voltage direct current (HVDC) transmission technology is a method that can efficiently transmit power to improve renewable energy consumption. Converter blocking of HVDC transmission system, especially DC bipolar blocking, can cause overvoltage surges in AC grid, which can force the renewable generators to be off-grid. The mathematical model of overvoltage of sending AC grid under DC blocking is established. The influence of reactive power of renewable energy generators on overvoltage in AC grid under DC blocking is analyzed. An optimal active power distribution strategy is proposed to increase the overall reactive power margin of sending AC grid to reduce overvoltage surges. A case is designed based on Matlab/Simulink to verify the proposed optimal active power distribution strategy.

Key words: renewable energy generation; high voltage direct current transmission; optimal output distribution; overvoltage suppression; DC blocking

0 引言

根据国际可再生能源机构理事会发布的《2022

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199722000H);四川省科技计划项目(2021JDTD0016)

年可再生能源产能统计》,2021年中国光伏发电机新装机容量为54.9 GW,风电机组新装机容量为47.6 GW。中国的太阳能资源主要集中在西部、北部地区,风能资源主要集中在“三北”地区,而用电负荷主要集中在中东部地区^[1]。高压直流(high

oltage direct current, HVDC) 输电技术是将电能进行远距离传输以解决源荷逆向分布问题的有效手段,因此高压直流输电工程在全球范围内得到广泛应用^[2]。

工程中广泛应用的高压直流输电系统的换流站采用晶闸管作为换流元件,整流桥和逆变桥在运行过程中都需要吸收大量无功功率(约为传输有功功率的 50%),因此必须在换流站中利用交流滤波器来补偿三相半控桥吸收的无功功率^[3-4]。

HVDC 系统的换流器闭锁故障是常见的直流故障之一,可分为单极闭锁故障和双极闭锁故障^[5]。当 HVDC 系统发生直流闭锁故障时,直流的功率传输通道被关闭,三相桥吸收的无功功率随着有功功率的降低而迅速降低。换流站中交流滤波器的盈余无功功率转移到交流电网,导致交流电网中产生过电压浪涌。直流双极闭锁引起的过电压比直流单极闭锁更严重^[6]。

现有的一些研究分析了直流闭锁下的过电压,并提出了改进的控制策略。文献[7]分析了双馈风力发电机组在直流闭锁过电压下的有功功率和无功功率的约束条件,并提出了单机的功率指令改进策略。文献[8]提出在风电场中安装超导故障电流限制器(superconducting fault current limiter, SFCL)和瞬态电压控制(transient voltage control, TVC),进而可有效提高风电场的高压穿越能力。文献[9]提出在整流站增加由金属氧化物压敏电阻组成的能量吸收支路,来减少直流闭锁故障下传输到交流电网的无功功率以减少过电压浪涌。文献[10]针对直流闭锁故障提出了一种交流电网过电压的计算方法,该方法计算准确但需要大量系统参数且过程复杂。

下面建立了一种用于快速估计直流单极闭锁以及直流双极闭锁故障下交流电网过电压浪涌峰值的数学模型,分析了可再生能源发电设备的无功功率对直流闭锁下交流电网过电压的影响。基于数学模型和影响分析,以提高交流电网的整体无功裕度为目标提出了适用多个可再生能源电站的最优出力分配策略,进而有效抑制直流闭锁下交流电网中的过电压。

1 直流闭锁故障下交流电网过电压特性

直流闭锁故障下换流站中交流滤波器盈余无功

涌入交流电网的情况在送受端电网中是对称的,考虑到大部分可再生能源发电设备往往安装在送端电网上,对过电压分析均基于送端电网展开。

典型的 HVDC 输电系统的拓扑结构如图 1 所示。多个风电场和多个光伏电站接入到送端交流电网中,送端电网中的火电厂用同步电机的次暂态电势和内阻抗等效,其中的内阻抗包括线路阻抗和发电机的次暂态电抗。HVDC 输电系统的每极都由一个十二脉动变流器构成,采用十二脉动变流器可有效避免五、七次谐波的产生。交流滤波器安装在含十二脉动变流器的换流站中,在为变流器提供无功功率补偿的同时起到消除高频谐波的作用。

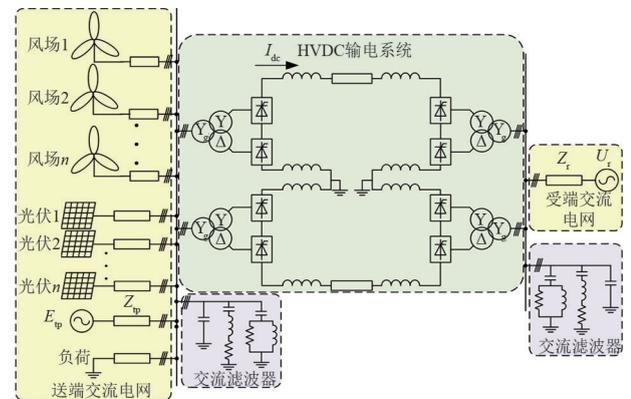


图 1 HVDC 系统的拓扑结构

由图 1 可知,送端交流电网的交流母线电压直接取决于火电厂的功率特性,送端电网的交流母线电压可表示为

$$U_{acs} = E_{tp} - \frac{R_{tp}}{E_{tp}} P_{tp} - \frac{X_{tp}}{E_{tp}} Q_{tp} \quad (1)$$

式中: U_{acs} 为送端交流母线电压; E_{tp} 为火电厂等效内电势; R_{tp} 为火电机组等效内电阻和火电厂到交流母线的线路电阻之和; X_{tp} 为火电机组等效内感抗和火电厂到交流母线的线路感抗之和; P_{tp} 、 Q_{tp} 分别为火电厂输出到交流母线的有功功率和无功功率。

整流站中三相桥需要吸收的有功功率和无功功率^[11]为

$$\begin{cases} P_{dc} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi} u_{acs} K_e i_{dc} \cos \alpha \\ Q_{dc} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi} u_{acs} K_e i_{dc} \sin \alpha = P_{dc} \tan \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中: i_{dc} 为 HVDC 系统的直流电流; K_e 为交流母线到全控桥上变压器的变比; α 为整流站的整流角; P_{dc} 、 Q_{dc} 分别为三相桥吸收的有功和无功功率。

忽略线路损耗和交流滤波器的有功功率,送端

交流电网的功率平衡方程可表示为

$$\begin{cases} P_{dc} = P_{tp} + \sum_{i=1}^n P_{PVi} + \sum_{j=1}^m P_{WFj} - P_{load} \\ Q_{dc} = Q_{tp} + \sum_{i=1}^n Q_{PVi} + \sum_{j=1}^m Q_{WFj} + Q_{SVC} - Q_{load} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{PVi} 、 Q_{PVi} 为 i 光伏电站输出到交流母线的有功功率、无功功率; P_{WFj} 、 Q_{WFj} 为 j 风电场输出到交流母线的有功功率和无功功率; Q_{ACF} 为交流滤波器输出的无功功率; P_{load} 、 Q_{load} 为负荷消耗的有功功率、无功功率; n 为光伏电站的数量; m 为风电场的数量。

在短期的直流闭锁故障下不考虑交流滤波器的投切,交流滤波器可视为线性元件,其无功功率为

$$Q_{ACF} = \frac{U_{acs}^2}{U_{ac0}^2} Q_{ACF0} \quad (4)$$

式中: U_{ac0} 为故障前的交流母线电压; Q_{ACF0} 为故障前交流滤波器输出的无功功率。

考虑到故障前交流滤波器的补偿无功功率与 HVDC 系统中三相桥吸收的无功功率相匹配,将式(2)代入式(4)中可得

$$Q_{ACF} = \frac{U_{acs}^2}{U_{ac0}^2} P_{dc0} \tan \alpha_0 \quad (5)$$

式中: P_{dc0} 为故障前 HVDC 系统传输的有功功率; α_0 为故障前的触发角。

风电场和光伏电站的功率特性与并网点 (point of common coupling, PCC) 电压之间的关系很复杂,不能用单一函数表示。此外,一般而言,电网负荷与交流母线电压之间的关系也是非线性的。采用机电暂态仿真的思想,将送端电网上的所有发电机组和负载都等效为一个具有阻抗的电压源。它的等效阻抗根据瞬态扰动下的电压波动确定;等效内电势则根据等效阻抗值和稳态的交流母线电压值计算确定。那么将式(3)代入式(1)并改写可得

$$U_{acs} = U_s - \frac{R_s}{U_s} P_{dc} - \frac{X_s}{U_s} (P_{dc} \tan \alpha - Q_{SVC}) \quad (6)$$

式中: R_s 为等效电阻; X_s 为等效感抗; U_s 为等效内电势。

考虑到等效电阻通常远小于等效电抗,将式(5)代入式(6),那么送端交流母线的电压可表示为

$$U_{acs} = U_s - \frac{R_s}{U_s} P_{dc} - \frac{X_s}{U_s} \left(P_{dc} \tan \alpha - \frac{U_{acs}^2}{U_{ac0}^2} P_{dc0} \tan \alpha_0 \right) \quad (7)$$

在直流闭锁故障下, HVDC 系统输送的有功功

率迅速下降,三相桥吸收的功率随闭锁迅速降低至 0。因此,直流闭锁下送端交流母线的过电压可表示为

$$U_{acs} = U_s + \frac{X_s}{U_s} \left(\frac{U_{acs}^2}{U_{ac0}^2} - \frac{p}{2} \right) P_{dc0} \tan \alpha_0 \quad (8)$$

式中, p 为和直流闭锁相关的系数,单极闭锁下, $p = 1$; 双极闭锁下, $p = 0$ 。

根据式(8)可知:直流双极闭锁故障下交流母线的过电压比直流单极闭锁故障下的过电压更严重。因此,对过电压的分析针对更严重的双极闭锁故障开展。

交流母线在双极闭锁故障下的过电压最大值 U_{acmax} 为

$$U_{acmax} = \frac{U_{ac0} - \sqrt{U_{ac0}^2 - 4X_s P_{dc0} \tan \alpha_0}}{2X_s P_{dc0} \tan \alpha_0} U_s U_{ac0} \quad (9)$$

在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型对式(9)进行验证。图 2 给出了不同传输功率和不同送端电网网架双极闭锁下送端电网过电压峰值的数学模型和仿真结果对比图。

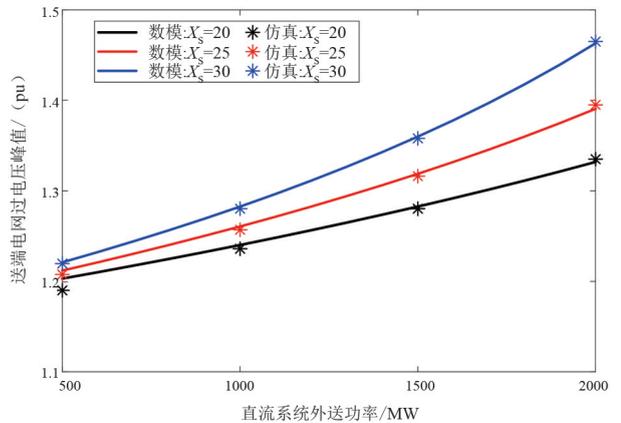


图 2 送端交流母线过电压峰值的数学模型与仿真结果对比

根据图 2,双极闭锁下仿真结果与数学模型计算结果的最大过电压峰值误差为 0.013 pu,说明式(9)的数学模型能够准确快速计算直流闭锁故障下的送端电网过电压峰值。

交流母线电压和 HVDC 系统输送的功率通常是故障前的额定值,而故障前换流站的整流角是一个无法直接调整的参数。根据式(9),直流闭锁下的过电压取决于送端电网的等效内电抗和等效内电势。考虑到送端电网的等效内电势是根据稳态功率流和等效内电抗计算的,因此只需要降低送端电网的等效内电抗即可有效抑制过电压。

2 提高无功裕度以抑制过电压的最优出力分配策略

2.1 可再生能源发电设备无功功率对交流母线过电压的影响

送端交流电网的等效内阻包括4个部分:1个火力场、 n 个光伏电站、 m 个风电场和1个非线性负荷。考虑到火力发电厂的调节特性缓慢且负荷特性不可随意调节,应当充分利用可再生能源发电设备的快速调节能力抑制交流母线中的过电压。

直流闭锁下的过电压是由于交流滤波向交流母线注入盈余的无功功率引起的,因此有必要让可再生能源发电设备在交流母线过电压阶段吸收更多的无功功率以抑制过电压。

根据式(1)和式(3),可再生能源发电设备的无功功率对交流电网电压的影响可表示为

$$\Delta U_{acs} = -\frac{R_{tp}}{E_{tp}}(\Delta P_{load} - \sum_{i=1}^n \Delta P_{PVi} - \sum_{j=1}^m \Delta P_{WFj}) - \frac{X_{tp}}{E_{tp}}(\Delta Q_{load} - \sum_{i=1}^n \Delta Q_{PVi} - \sum_{j=1}^m \Delta Q_{WFj} - \Delta Q_{SVC}) \quad (10)$$

式中, Δ 代表变化量。

根据式(4),当交流母线电压变化不大时对交流滤波器进行局部线性化,则交流滤波器的无功功率变化可表示为

$$\Delta Q_{ACF} = \frac{2P_{dc0} \tan \alpha_0}{U_{ac0}} \Delta U_{acs} \quad (11)$$

考虑到发电机的内电阻远小于内电抗,线路电阻也远小于线路电抗,因此有 $R_{tp} \ll X_{tp}$ 。对于交流母线而言,负载吸收的无功功率相对较小。

$$\Delta U_{acs} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta Q_{PVi} + \sum_{j=1}^m \Delta Q_{WFj}}{\frac{E_{tp}}{X_{tp}} - \frac{2P_{dc0} \tan \alpha_0}{U_{ac0}}} \quad (12)$$

根据式(12)可知,增加光伏电站和风电场吸收的无功功率可以有效降低交流母线的过电压。

2.2 最优出力分配策略

在低负荷或强光和强风期间,由于电网消纳能力优先,可再生能源发电设备需要对有功功率输出进行限制。此处所提的最优出力分配策略,是以抑

制直流闭锁下交流母线过电压为目标设计的可再生能源电站的出力调配策略,属于事先分配策略。根据第1章中的数学模型,当送端电网过电压峰值超过1.3 pu时,认为系统在直流闭锁下存在脱网运行的风险,启动所提的出力调配策略。

可再生能源发电设备通常通过网侧变换器(grid-side converters, GSC)与交流电网相连。因此,可再生能源发电设备吸收的无功功率受到GSC容量的限制,可再生能源发电设备的功率限制可表示为

$$\begin{cases} P_{PVi}^2 + Q_{PVi}^2 \leq S_{PVi}^2 \\ P_{WFj}^2 + Q_{WFj}^2 \leq S_{WFj}^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: S_{PVi} 为*i*光伏电站中GSC所能承受的最大容量; S_{WFj} 为*j*风电场中GSC所能承受的最大容量。

根据第2.1节中的推导,以送端电网中总无功裕量最大为优化目标时对送端电网过电压的抑制效果最好,因此最优出力分配的目标函数 Q_{re_all} 为

$$Q_{re_all} = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_{PVi}^2 - P_{PVi}^2} + \sum_{j=1}^m \sqrt{S_{WFj}^2 - P_{WFj}^2} \quad (14)$$

有功功率的边界条件可以表示为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n P_{PVi} + \sum_{j=1}^m P_{WFj} = P_{load} + P_{dc} \\ P_{PVi}^{min} \leq P_{PVi} \leq P_{PVi}^{max}, i = 1, 2, \dots, n \\ P_{WFj}^{min} \leq P_{WFj} \leq P_{WFj}^{max}, j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (15)$$

式中: P_{PVi}^{max} 、 P_{PVi}^{min} 为*i*光伏电站的最大出力 and 最小出力; P_{WFj}^{max} 、 P_{WFj}^{min} 为*j*风电场的最大出力 and 最小出力。

式(15)中的边界条件相对简单,可用最优潮流的思路引入拉普拉斯算子,并计算出所有未知数的偏导数都为0的极值点。易知,当有功出力与GSC容量按等比例分配时,目标函数 Q_{re_all} 可以取得最大值。最优出力分配策略的流程如图3所示。

第一步,计算负载和HVDC系统的功率。第二步,获取当前每个可再生能源发电场站的有功出力范围和GSC容量。第三步,按照GSC容量的比例分配可再生能源发电场站的有功出力。第四步,判断每个发电场站的出力是否都在允许出力范围内;若都不超过出力范围,则将当前每个发电场站出力作为最终的最优出力分配方案;若存在超出出力范围的发电场站,则将小于最小出力的发电场站出力取

最小值,将大于最大出力的发电场站出力取最大值,从总功率和需要分配出力的发电场站合集中剔除这些已经确定出力的极限发电场站,然后返回第三步重新计算。

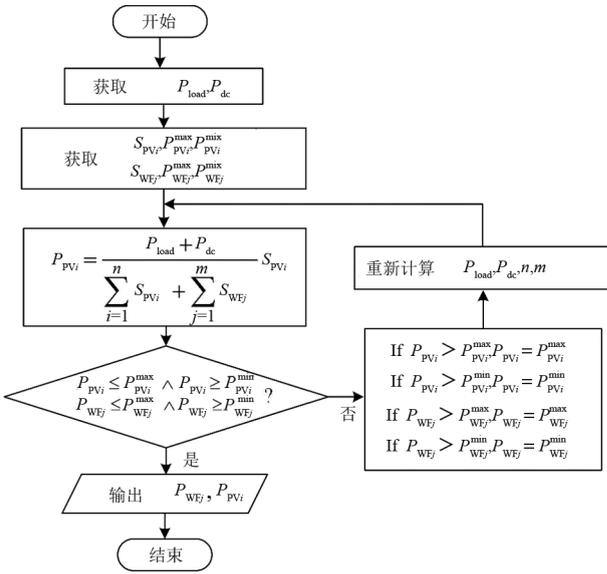


图 3 最优出力分配策略的流程

3 仿真验证

下面设计了一个可再生能源发电机组有功盈余工况下的出力分配案例,以验证了所提出的最优出力分配策略的优越性。送端电网上的火电机组最小运行功率为 600 MW,负荷功率为 500 MW, HVDC 系统的电压等级为 ±500 kV,其最大外送功率为 1500 MW。表 1 和表 2 分别给出了风电场和光伏电站的当前出力范围以及 GSC 的容量。

表 1 风电场的出力与容量限制 单位:MW

编号	GSC 最大容量 S_{WE_j}	最大 $P_{WE_j}^{max}$	最小出力 $P_{WE_j}^{min}$
WF1	200	200	50
WF2	220	200	50
WF3	260	200	50
WF4	80	80	30
WF5	300	100	50

表 2 光伏电站的出力与容量限制 单位:MW

编号	GSC 最大容量 S_{PV_i}	最大出力 $P_{PV_i}^{max}$	最小出力 $P_{PV_i}^{min}$
PV1	220	220	110
PV2	180	180	90
PV3	120	120	60
PV4	280	280	140
PV5	320	300	150

根据表 1 和表 2,可再生能源发电场站的最大输出功率为 1880 MW,超过送端电网的最大有功消纳能力 480 MW,即需要弃风/弃光总计 480 MW。优化前方案采用平均弃风/弃光策略,10 个场站每个出力比最大出力降低 48 MW,优化后出力方案根据图 3 的流程图计算得到。表 3 给出了不同场站在不同出力分配策略下的有功出力。

表 3 可再生能源电站的有功出力 单位:MW

编号	优化前出力	优化后出力	编号	优化前出力	优化后出力
WF1	152	138.3	PV1	172	152.1
WF2	152	152.1	PV2	132	124.5
WF3	152	179.8	PV3	72	83.0
WF4	32	55.3	PV4	232	193.6
WF5	52	100.0	PV5	252	221.3

根据式(14),优化前送端电网的总无功裕度为 1240 Mvar,采用最优出力分配策略后送端电网的无功裕度为 1671 Mvar。所提最优出力分配策略将送端电网的总无功裕度提升了 431 Mvar。

根据图 1 中的 HVDC 系统拓扑以及案例中的负荷和系统外送功率情况,基于 Matlab/Simulink 建立了电压等级为 ±500 kV 的 HVDC 系统仿真。图 4 给出了在采用所提出的最优出力分配策略前,即采用平均弃风/弃光,直流双极闭锁故障下送端交流母线的电压波形。其中,直流双极闭锁故障发生在 1.5 s。

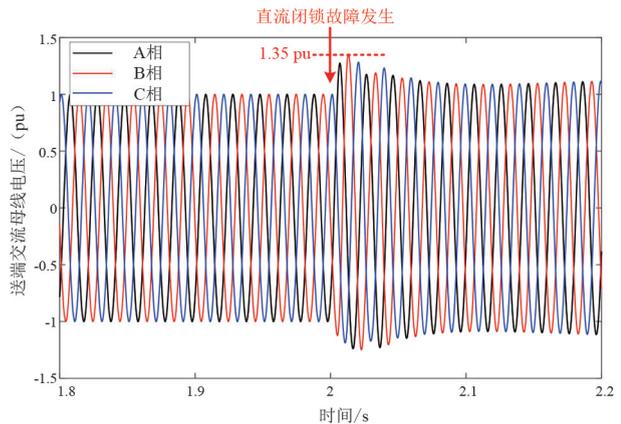


图 4 采用平均弃风/弃光策略下送端交流母线电压

从图 4 中可知,采用平均弃风/弃光策略时,在直流双极闭锁故障下,送端电网交流母线的最大过电压为 1.35 pu。

图 5 给出了采用所提出的最优出力分配策略时,直流双极闭锁故障下送端交流母线的电压波形。从图 5 中可知,采用最优出力分配策略时,在直流双

极闭锁故障下,送端电网交流母线的最大过电压为 1.28 pu。

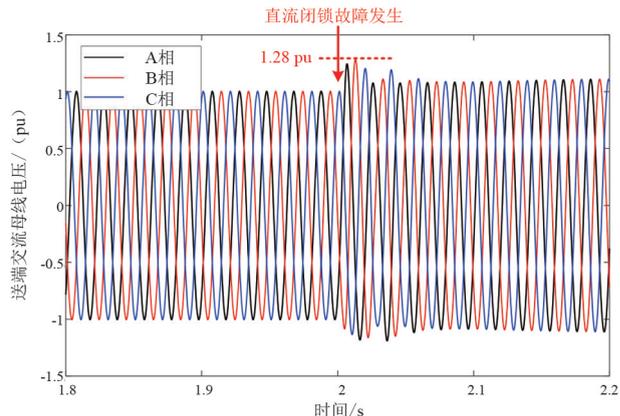


图 5 采用最优出力分配策略下送端交流母线电压

在本案例中,所提出的最优出力分配策略将送端交流电网的总无功容量增加了 431 Mvar,相比于原方案无功裕量提升了 25.8%。所提出的最优出力分配策略可以将送端交流母线上的过电压峰值从 1.35 pu 抑制至 1.28 pu,过电压被抑制了 0.07 pu,占原过电压的 20%。因此,所提最优出力分配策略可有效降低可再生能源发电设备在直流闭锁故障下脱网运行的风险。

4 结 论

直流闭锁故障会在交流电网中产生严重的过电压,尤其是双极闭锁时过电压尤为严重。上面建立了直流闭锁故障下 HVDC 系统的简化模型,给出了直流闭锁下过电压峰值的快速计算方法;分析了可再生能源发电设备对交流母线过电压的影响。基于分析提出了一种以无功裕度最大为目标函数的最优出力分配策略,通过仿真验证了所提的最优出力分配策略对直流闭锁下过电压抑制的有效性。

参考文献

- [1] 陈国平,梁志峰,董昱.基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(2):369-379.
- [2] 刘泽洪.±1100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7782-7792.
- [3] 宋凯洋,姚骏,汪军.高压直流输电系统单极闭锁故障

下同步调相机与 STATCOM 的对比研究[J].电源学报,2021,19(6):154-163.

- [4] 年珩,金萧,李光辉.特高压直流换相失败对送端电网风机暂态无功特性的影响分析[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4111-4122.
- [5] 陈汉雄.直流功率转移对川渝弱交流电网安全稳定影响分析[J].电网技术,2018,42(12):4145-4152.
- [6] 邱威,贺静波,樊小伟,等.应对特高压直流大扰动的稳定措施综述[J].电网技术,2022,46(8):3049-3067.
- [7] ZHOU Changping, WANG Zhen, JU Ping, et al. High-voltage ride through strategy for DFIG considering converter blocking of HVDC system[J].Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2020,8(3):491-498.
- [8] Ran O, Xiao X Y, Zou Z C, et al. Cooperative control of SFCL and reactive power for improving the transient voltage stability of grid-connected wind farm with DFIGs [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7):1-6.
- [9] FANG Xiongfeng, LI Gen, CHEN Canfeng, et al. An energy absorbing method for hybrid MMCs to avoid full-bridge submodule overvoltage during DC fault blocking [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5):4947-4951.
- [10] 尹纯亚,李凤婷,周识远,等.基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法[J].电力系统自动化,2019,43(10):150-154.
- [11] JIN Xiao, NIAN Heng. 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.

作者简介:

史华勃(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能技术和电力系统分析计算与稳定控制;

丁理杰(1981),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统稳定分析和控制;

焦浩然(1999),男,硕士研究生,研究方向为暂态谐波扰动下双馈风电建模与控制技术;

金萧(1995),男,博士研究生,研究方向为新能源并网运行技术和特高压直流输电系统故障分析;

年珩(1978),男,博士,教授,研究方向为风电并网及控制技术。

(收稿日期:2022-10-27)