

基于无功功率短路比的直流闭锁暂态过电压计算方法

尹纯亚¹, 李凤婷¹, 周识远², 陈伟伟³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830047;

2. 国网甘肃省电力有限公司风电技术中心, 甘肃省兰州市 730050;

3. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830011)

摘要: 针对现有特高压直流闭锁引起交流系统换流母线暂态过电压计算方法在极低短路比情况下可能无实解的问题, 基于直流闭锁后的谐振电路, 推导建立了暂态过电压与谐振频率的关系式。参照短路比的定义, 提出无功功率短路比的概念, 在此基础上, 提出适用范围更广的直流闭锁暂态过电压计算方法。研究发现, 换流母线暂态过电压随着无功功率短路比的减小呈非线性加速上升的趋势。以 DiGILENT 为平台搭建国际大电网会议(CIGRE)直流输电标准测试系统与±800 kV 天中直流送端系统, 仿真分析验证了所提出的暂态过电压计算方法的有效性, 在极低短路比系统中仍然适用。

关键词: 特高压直流; 直流闭锁; 暂态过电压; 无功功率短路比

0 引言

与交流输电系统相比, 特高压直流输电在大容量、远距离输送电能上具有无可比拟的优势^[1-5]。但特高压直流系统的换流站在运行中需要消耗大量的无功功率^[6-7], 一旦直流系统发生闭锁故障, 换流站消耗的无功功率瞬时降低, 由于换流站内的无功补偿装置来不及切除, 盈余的无功功率将倒送到交流系统引起严重的暂态过电压^[8], 严重威胁电力系统的安全稳定运行。

针对直流闭锁后的暂态过电压, 文献[9-12]分别分析了直流闭锁与换相失败引发直流近区暂态过电压进而可能导致风机高压脱网的问题, 并提出了应对措施; 文献[13-14]依托仿真软件搭建实际大电网模型, 对直流闭锁后的电压、频率进行了仿真分析; 文献[15-16]分析了直流运行异常引起的过电压对风电、光伏运行的影响; 文献[17-18]分别研究了直流闭锁与换相失败后的有功、无功特性, 并给出了功率波动峰值的近似计算方法。

以上研究都是针对直流闭锁引起暂态过电压的定性分析, 但针对暂态过电压的定量计算方面的研究较少。文献[19]提出了一种暂态过电压定量计算

方法, 并分析了暂态过电压与短路比、闭锁容量的关系。该方法在短路比较高的系统, 可以较好地衡量暂态过电压程度, 但应用于短路比较低的系统时, 可能出现没有实解的情况, 且换流站消耗的无功功率与直流闭锁容量也会影响其适用性; 文献[19]得出双极闭锁暂态过电压上升量是单极闭锁的 2 倍的结论只适用于高短路比的系统。

针对现有特高压直流闭锁暂态过电压计算方法适用性有限的问题, 从并联谐振的角度推导出适用性更广的换流母线暂态过电压定量计算方法, 对闭锁容量与暂态过电压的关系进行定量研究, 并分析新能源脱网对暂态过电压的影响, 最后搭建仿真模型进行仿真验证。

1 直流闭锁暂态过电压计算方法

1.1 暂态过电压计算

直流发生闭锁后, 交流系统等值电流源 \dot{I}_s 、等值电感 L_e 与换流站无功功率等值电容 C 构成的等值电路如图 1 所示, 其中 \dot{I}_L 和 \dot{I}_C 分别为交流系统等值电感电流和等值电容电流, ω_0 为基波角频率。

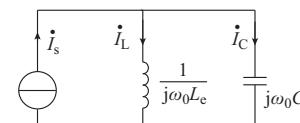


图 1 直流闭锁后的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit after DC blocking

收稿日期: 2018-11-14; 修回日期: 2019-01-11。

上网日期: 2019-03-26。

新疆维吾尔自治区科技支疆项目(2017E0277); 国家电网公司科技项目(SGXJJY00GHJS1800065)。

根据图 1 可得到换流母线处电压 \dot{U}_L (与等值电容的电压相等) 表达式为:

$$\dot{U}_L = \frac{1}{\frac{1}{j\omega_0 L_e} + j\omega_0 C} \dot{I}_s \quad (1)$$

等值电势 \dot{U}_e 与等值电流源、等值电感的关系为:

$$\dot{U}_e = j\omega_0 L_e \dot{I}_s \quad (2)$$

则消去电流项可得换流母线电压与等值电势的关系为:

$$\dot{U}_L = \frac{\dot{U}_e}{1 - \omega_0^2 L_e C} \quad (3)$$

由式(3)可以看出, 直流闭锁后换流母线暂态过电压主要与交流系统的等值电势、等值电感与等值电容有关。

图 1 中并联谐振电路的谐振角频率为:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_e C}} \quad (4)$$

联立式(4)与式(3)可得换流母线暂态过电压为:

$$\begin{cases} U_L' = U_e \frac{F_r^2}{F_r^2 - 1} \\ F_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} \end{cases} \quad (5)$$

其中, 当 $\omega_r = 2\omega_0$ 时, 则谐振频率等于 2 倍基波频率。

交流系统等值电抗为:

$$X_e = \frac{U_{LN}^2}{S_{CR} P_{dN}} \quad (6)$$

式中: U_{LN} 为换流母线额定线电压; P_{dN} 为直流额定传输有功功率; S_{CR} 为短路比。

则等值电感为:

$$L_e = \frac{X_e}{\omega_0} = \frac{U_{LN}^2}{\omega_0 S_{CR} P_{dN}} \quad (7)$$

直流闭锁后, 等值电势表达式为^[19]:

$$U_e = U_{LN} + \frac{Q_c X_e}{U_{LN}} \quad (8)$$

式中: Q_c 为换流站无功补偿装置提供的无功功率, 当直流系统间没有无功功率交换时, $Q_d = Q_c = kP_d$ (P_d 为直流传输的有功功率), 则有

$$X_c = \frac{Q_c}{U_{LN}^2} = \frac{kP_d}{U_{LN}^2} \quad (9)$$

$$C = \frac{kP_d}{\omega_0 U_{LN}^2} \quad (10)$$

将式(7)与式(10)代入式(4)中可得:

$$\begin{cases} \omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_e C}} = \omega_0 \sqrt{\frac{S_{CR} P_{dN}}{kP_d}} \\ F_r = \frac{\omega_r}{\omega_0} = \sqrt{\frac{S_{CR} P_{dN}}{kP_d}} \end{cases} \quad (11)$$

S_{CR} 是交流系统短路容量与直流额定传输功率的比值^[20], 且直流传输有功功率与消耗无功功率存在密切的关系, 但两者之间的关系受实际交直流系统运行方式的影响, 直流系统实际运行时的功率不一定按照额定功率进行传输, 可能导致应用 S_{CR} 衡量暂态过电压的结果不够精确。

$S_{CR} = S_c / P_{dN}$, S_c 为交流系统短路容量。将式(8)与式(11)代入式(5)可得直流闭锁后的换流母线暂态过电压标幺值的解析表达式为:

$$U_L' = \frac{F_r^2 + 1}{F_r^2 - 1} = \frac{S_c + Q_c}{S_c - Q_c} \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 直流闭锁后的暂态过电压程度受交流系统的短路容量与换流站内配置的无功补偿容量的影响。

1.2 无功功率短路比

由 1.1 节分析可知, 短路容量与无功功率是暂态过电压的主要影响因素。 S_{CR} 指标只是在一定程度上反映了短路容量, 并不能准确反映换流站无功功率的情况, 不同系统之间仅仅通过比较其短路比也只能给出相对的趋势, 具有相同 S_{CR} 的交直流系统, 由于换流站消耗的无功功率不同, 其暂态过电压程度可能有很大差别。

同为 $S_{CR} = 2.5$ 的系统在换流站分别配置 40%, 50%, 60% 直流输送有功功率的无功补偿量仿真结果对比如附录 A 图 A1 所示。可以看出, 直流闭锁后暂态过电压受到换流站内无功补偿容量的影响依然很大, 想要精确地衡量直流闭锁后暂态过电压程度, 根据式(12), 可知需要同时考虑 S_{CR} 与换流站消耗的无功功率的影响。

参考短路比的定义, 提出无功功率短路比的概念, 表达式为:

$$R_r = \frac{S_c}{Q_c} \quad (13)$$

由式(13)可知, R_r 将交流系统短路容量与换流站无功补偿容量同时考虑在内, 且是换流母线暂态过电压的表达式的唯一变量。 S_c 反映了交流系统的强度, Q_c 反映了换流站内无功补偿容量, 可以更准确地衡量直流闭锁后的暂态过电压程度。

1.3 基于无功功率短路比的暂态过电压计算

将式(13)代入式(12)可得换流母线暂态过电压表达式为:

$$U_L' = \frac{R_r + 1}{R_r - 1} \quad (14)$$

根据式(14)可得闭锁换流母线暂态过电压与无功功率短路比的关系曲线如附录 A 图 A2 所示。由该图可以看出, 直流闭锁后的换流母线电压随着 R_r 的减小呈非线性加速上升的趋势, 双极闭锁导致的暂态过电压较单极闭锁更大。当 $R_r = 2$ 时, 若 $Q_C = Q_d = 0.5P_{dn}$, 则 $S_{CR} = 1$, 可以看出本文暂态过电压计算方法依然有实解。当无功功率短路比较小时, 闭锁后的暂态过电压程度急剧上升, 严重威胁电力系统的安全稳定运行。

1.4 单、双极闭锁暂态过电压

1.3 节中对于双极闭锁导致的暂态过电压与单极闭锁的关系只能看到相对的趋势, 因此本节将定量分析两者的关系。

双极闭锁导致的暂态压升为:

$$\Delta U_{bip} = \frac{R_{r,bip} + 1}{R_{r,bip} - 1} - 1 = \frac{2}{R_{r,bip} - 1} \quad (15)$$

式中: $R_{r,bip}$ 为双极运行时的无功功率短路比。

单极闭锁导致的暂态压升为:

$$\Delta U_{monop} = \frac{R_{r,monop} + 1}{R_{r,monop} - 1} - 1 = \frac{2}{R_{r,monop} - 1} \quad (16)$$

式中: $R_{r,monop}$ 为单极运行时的无功功率短路比。

设交直流系统双极运行时双极、单极闭锁导致的暂态过电压的压升比值为 b , $R_{r,monop} = 2R_{r,bip}$, 其中 $R_{r,bip} = R_r$, 可得 b 与 R_r (双极运行状态下的 R_r) 的关系如式(17)与附录 A 图 A3 所示。

$$b = \frac{2R_r - 1}{R_r - 1} = 2 + \frac{1}{R_r - 1} \quad (17)$$

由式(17)与附录 A 图 A3 可以看出, 虽然双极闭锁容量是单极闭锁的 2 倍, 但双极闭锁导致的暂态压升与单极闭锁的比值大于 2, 且随着 R_r 的降低呈非线性加速上升的趋势, 即系统强度越低, 双极闭锁将会导致越严重的暂态压升, 进一步说明闭锁后的暂态过电压与闭锁容量呈非线性关系。

2 送端新能源脱网对暂态过电压的影响

直流闭锁后一般延时 t (一般为 200 ms)切除换流站内无功补偿装置和滤波器, 如果送端系统为新能源高渗透系统, 其间的暂态过电压有可能导致高电压穿越能力不足的新能源机组连锁脱网, 交流系统失去交流电源会导致短路容量降低, 设新能源机组脱网的短路容量为 S_{CW} , 则换流母线暂态电压为:

$$U_L' = \frac{\frac{S_c - S_{CW}}{Q_C} + 1}{\frac{S_c - S_{CW}}{Q_C} - 1} = \frac{R_r' + 1}{R_r' - 1} \quad (18)$$

新能源机组脱网后的无功功率短路比为 R_r' , 根据附录 A 图 A2 与式(18)可得出随着新能源脱网容量的增大, 交流系统短路容量越低, 新能源脱网恶化暂态过电压的程度越大, 进一步增大新能源大规模脱网的风险, 可能引发连锁事故, 威胁送端系统的安全稳定运行。

3 算例分析

3.1 直流输电标准测试系统仿真验证

本文首先采用国际大电网会议(CIGRE)直流输电标准测试系统进行仿真验证, 系统的结构与参数如附录 A 图 A4 与附录 B 表 B1 所示。

现有计算方法与本文所提计算方法得到曲线结果、与进行大量的仿真分析得到直流闭锁后换流母线暂态电压(标么值)随 R_r 变化的结果对比见图 2。

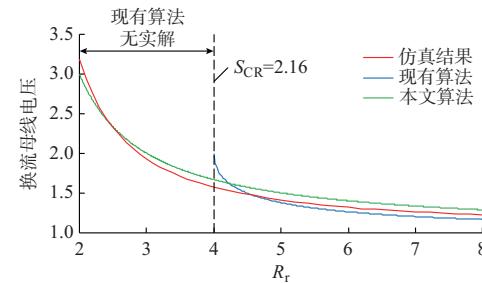


图 2 不同计算方法的比较结果
Fig. 2 Comparison result of different calculation methods

由图 2 可以看出在短路比较低的情况下, 本文算法依然有实解, 本文算法可正确反映暂态过电压的上升趋势与过电压程度, 能够适应交流系统强度较低的系统。

考虑到运行时换流站消耗的无功功率一般为传输有功功率的 40%~60%^[10-11], 算例中 k 取值为 0.54 时, 当直流传输功率为 1 000 MW, R_r 为 3, 4, 6, 8 时, 直流闭锁换流母线暂态过电压仿真结果与计算结果对比如表 1 所示。

表 1 不同短路容量下的换流母线暂态过电压结果

Table 1 Transient overvoltage result of commutation bus with different short-circuit capacities

S_c/MVA	Q_C/Mvar	R_r	暂态过电压		误差/%
			仿真值	本文算法	
1 620	540	3	1.90	2.00	5.0
2 160	540	4	1.59	1.67	4.8
3 240	540	6	1.33	1.40	5.0
4 320	540	8	1.26	1.29	2.3

交流系统短路容量 $S_c = 4 320 \text{ MVA}$, 直流传输功率为 1 000, 1 500, 2 000, 2 500 MW 时的仿真结果与计算结果对比如表 2 所示。

表 2 不同传输功率下的换流母线暂态过电压结果
Table 2 Transient overvoltage results of commutation bus with different transmission power

$S_c/$ MVA	$P_d/$ MW	$Q_c/$ Mvar	R_r	暂态过电压		误差/%
				仿真值	本文算法	
4 320	1 000	540	8.00	1.26	1.29	2.3
4 320	1 500	810	5.33	1.43	1.46	2.1
4 320	2 000	1 080	4.00	1.60	1.67	4.0
4 320	2 500	1 350	3.20	1.85	1.91	3.1

仿真结果验证了本文提出的直流闭锁暂态过电压计算方法能够适用于不同运行方式下的交直流系统,适应范围较广。在交流系统短路容量与换流站内无功补偿容量已知的情况下,本文方法可简单、快捷地计算暂态过电压程度,为稳控方案的快速制定提供参考依据,提高系统稳定性。

3.2 实际电网仿真验证

为进一步验证本文所提算法的正确性,参照±800 kV 天中直流送端系统哈密电网(结构示意图见附录 A 图 A5),以 DIgSILENT 为平台搭建仿真模型进行验证。

仿真算例中,短路容量都为 26 763 MVA,交直流系统稳态运行时:单极运行输送有功功率为 4 000 MW,换流站消耗无功功率为 2 018.8 Mvar,换流站无功补偿装置发出 1 935 Mvar;双极输送有功功率为 8 000 MW,换流站消耗无功功率为 4 772 Mvar,换流站无功补偿装置发出 4 533.8 Mvar。1 s 时天中直流分别发生单、双极闭锁后换流母线暂态过电压如附录 A 图 A6 和表 3 所示;1.1 s 时不同新能源短路容量脱网下的换流母线电压仿真结果如附录 A 图 A7 所示。

表 3 换流母线暂态过电压响应结果

Table 3 Transient overvoltage response results of commutation bus

闭锁容量/MW	R_r	暂态过电压		误差/%
		仿真值	理论值	
4 000	13.25	1.14	1.16	1.7
8 000	5.90	1.35	1.41	4.3

从表 3 所示的仿真结果与理论计算结果对比可以看出,直流单极闭锁与双极闭锁暂态过电压误差都小于 5%,产生误差的主要原因是理论推导时,忽略了直流闭锁前交直流系统间的无功交换量,无功交换量较大时,本文算法的精度将受到影响。

双极运行会消耗更大的无功功率,在相同短路容量情况下,无功功率短路比更低,引起的暂态压升更大,与前文理论分析结果一致;由表 3 数据可以计算得出双极闭锁暂态压升与单极闭锁比值的仿真值与理论值分别为 2.5 与 2.56,误差为 2.3%,进一步

说明闭锁容量与暂态压升呈非线性加速上升的关系,与理论分析结果吻合;附录 A 图 A7 仿真结果表明,新能源机组在滤波器切除之前脱网,将会对交流系统造成二次冲击,进一步恶化暂态过电压。对于天中直流而言,应合理控制直流的传输功率,避免大容量闭锁对新能源机组的冲击,进而发生大规模脱网事故。

4 结语

本文提出适用范围更广的暂态过电压计算方法,研究发现交流系统短路容量与无功功率是引起暂态过电压的主要因素。定义了无功功率短路比来衡量直流闭锁后的暂态过电压程度,分析了无功功率短路比与暂态过电压间的关系,并定量研究了双极闭锁与单极闭锁暂态压升的比值,指出直流闭锁后的暂态过电压与闭锁容量成呈非线性关系;新能源机组脱网会进一步抬升暂态过电压。分别搭建 CIGRE 直流输电标准测试系统与天中直流送端系统,仿真验证了本文方法与指标的有效性与正确性。本文提出的暂态过电压计算方法可为特高压直流规划、交直流系统稳定性分析提供理论依据;也可为分析新能源机组高压脱网的风险以及新能源高电压穿越标准制定提供理论指导;相关结果对直流闭锁后稳控措施制定具有一定的参考价值。

本文仅讨论了暂态过电压与风电机组脱网存在的关系,后续将对两者间的相互作用机理做进一步研究。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

- [1] 杨海涛,吉平,苗森,等.未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析[J].电力系统自动化,2018,42(6):9-17. DOI: 10.7500/AEPS20170808004.
YANG Haitao, JI Ping, MIAO Miao, et al. Analysis on interrelationship between future UHV power grid structural form and power source composition in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 9-17. DOI: 10.7500/AEPS20170808004.
- [2] 郑超,莫品豪,文继峰,等.直流滤波器高压电容器接地故障保护判据和方案[J].电力系统自动化,2018,42(1):132-137. DOI: 10.7500/AEPS20170613014.
ZHENG Chao, MO Pinhao, WEN Jifeng, et al. Criterion and scheme for high-voltage capacitor earth fault protection of DC filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 132-137. DOI: 10.7500/AEPS20170613014.
- [3] 闪鑫,王轶禹,金一丁,等.特高压互联电网一体化监视和故障协同处置方案及应用[J].电力系统自动化,2018,42(2):84-91. DOI: 10.7500/AEPS20170320005.
SHAN Xin, WANG Yiyu, JIN Yiding, et al. Scheme and

- application of integrated monitoring and fault co-disposal technology of UHV interconnected power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 84-91. DOI: 10.7500/AEPS20170320005.
- [4] 徐式蕴,吴萍,赵兵,等.哈郑直流受端华中电网基于响应的交直流协调控制措施[J].电网技术,2015,39(7):1773-1778.
XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Hami to Zhengzhou[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1773-1778.
- [5] 吴萍,林伟芳,孙华东,等.多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J].电网技术,2012,36(5):269-274.
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 269-274.
- [6] 罗煦之,张健,贺静波,等.计及暂态过电压约束的直流闭锁安控与极控协调控制研究[J].电网技术,2015,39(9):2526-2531.
LUO Xuzhi, ZHANG Jian, HE Jingbo, et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage [J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2526-2531.
- [7] LI F, CHEN Q, LIN X, et al. Simulation on power characteristic of UHVDC during commutation failure and DC block [C]// IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), October 22-25, 2017, Saskatoon, Canada: 6p.
- [8] NIE H, SONG W, ZHU Y, et al. Dynamic and static performance optimization of dual active bridge DC-DC converters [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(3): 607-618.
- [9] 韩平平,陈凌琦,胡迪,等.直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J].电力系统保护与控制,2018,46(5):99-105.
HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105.
- [10] 屠竞哲,张健,刘明松,等.风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J].电网技术,2015,39(12):3333-3338.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, LIU Mingsong, et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3333-3338.
- [11] 贺静波,庄伟,许涛,等.暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J].电网技术,2016,40(6):1839-1844.
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Study on cascading tripping risk of wind turbines caused by transient overvoltage and its countermeasures [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [12] 韩平平,张海天,丁明,等.大规模高压直流输电系统闭锁故障下送端风电场高电压穿越的控制策略研究[J].电网技术,2018,42(4):1086-1095.
HAN Pingping, ZHANG Haitian, DING Ming, et al. A coordinated HVRT strategy of large-scale wind power transmitted by HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1086-1095.
- [13] 袁森,陈得治,罗亚洲,等.直流闭锁冲击弱交流通道的稳定性及多资源协调控制措施[J].电力自动化设备,2018,38(8):203-210.
YUAN Sen, CHEN Dezhi, LUO Yazhou, et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 203-210.
- [14] 钟显,樊艳芳,王一波,等.含高密度风电、交直流送端电网直流闭锁故障稳控方案研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(13):130-138.
ZHONG Xian, FAN Yanfang, WANG Yibo, et al. Research of stability control strategies for high density wind power, AC-DC sending grid bipole trip[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 130-138.
- [15] 贺静波,万磊,霍超,等.高压直流输电非典型工况下过电压异常风险分析[J].电网技术,2014,38(12):3459-3463.
HE Jingbo, WAN Lei, HUO Chao, et al. Abnormal overvoltage risk analysis of HVDC transmission on atypical conditions[J]. Power System Technology, 2014, 38 (12): 3459-3463.
- [16] 吴萍,陈昊,赵兵,等.风光火打捆交直流混联外送系统交互影响及稳定性研究[J].电网技术,2016,40(7):1934-1942.
WU Ping, CHEN Hao, ZHAO Bing, et al. Study on interaction and stability characteristics of bundled wind-PV-thermal power transmitted with AC/DC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1934-1942.
- [17] TU J, PAN Y, ZHANG J, et al. Transient reactive power characteristics of HVDC during commutation failure and impact of HVDC control parameters [J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 1134-1139.
- [18] 屠竞哲,杨莉,黄涌,等.直流闭锁引发交流联络线功率波动的机理以及峰值计算[J].电力自动化设备,2013,33(1):12-17.
TU Jingzhe, YANG Li, HUANG Yong, et al. Mechanism and peak value calculation of AC tie-line power swing caused by DC blocking [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(1): 12-17.
- [19] 王峰,刘天琪,丁媛媛,等.直流闭锁引起的暂态过电压计算方法及其影响因素分析[J].电网技术,2016,40(10):3059-3065.
WANG Feng, LIU Tianqi, DING Yuanyuan, et al. Calculation method and influencing factors of transient overvoltage caused by HVDC block[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3059-3065.
- [20] KIM C K. 高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用 [M]. 北京:机械工业出版社,2014:138-139.
KIM C K. Application of HVDC—power conversion in power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014: 138-139.

尹纯亚(1994—),男,博士研究生,主要研究方向:交直流系统稳定与控制。E-mail: 1399132297@qq.com

李凤婷(1965—),女,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:可再生能源并网技术。E-mail: xjlf2009@sina.com

周识远(1984—),男,高级工程师,主要研究方向:智能电网、新能源并网控制及可靠性分析。E-mail: 18294094@qq.com

(编辑 蔡静雯)

(下转第 161 页 continued on page 161)

Calculation Method of Transient Overvoltage Due to DC Blocking Based on Short Circuit Ratio of Reactive Power

YIN Chunya¹, LI Fengting¹, ZHOU Shiyuan², CHEN Weiwei³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Wind Power Technology Center of State Grid Gansu Electric Power Co. Ltd., Lanzhou 730050, China;

3. Economic Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co. Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: The existing calculation methods of transient overvoltage on the commutation bus due to the ultra-high voltage direct current (UHVDC) blocking have no real solution in the case of extremely low short-circuit ratio. Based on the resonant circuit after DC blocking, this paper deduces and establishes the expression of the relationship between transient overvoltage and resonant frequency. Referring to the definition of short circuit ratio, the concept of reactive power short-circuit ratio is proposed. Then, a method for calculating transient overvoltage after DC blocking is proposed with wider application range. It is found that the trend of transient overvoltage on the commutation bus is nonlinear and accelerates with the decrease of reactive power short circuit ratio. Finally, based on the DIgSILENT simulation platform, the DC transmission standard test system of International Council on Large Electric Systems and Xinjiang Tianshan-Zhongzhou DC transmission system of China are built to verify the proposed calculation method of transient overvoltage. The simulation results show that the proposed calculation method is effective and applicable in the system with extremely low short-circuit ratio.

This work is supported by Science and Technology Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region for Promoting Its Self-development (No. 2017E0277) and State Grid Corporation of China (No. SGXJJY00GHJS1800065).

Key words: ultra-high voltage direct current (UHVDC); DC blocking; transient overvoltage; reactive power short circuit-ratio