

送端系统对交直流系统输送功率极限的影响

李欣蔚¹, 刘崇茹¹, 韩玉蓉², 王莉丽¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206; 2. 国网山东省电力公司, 山东省济南市 250012)

摘要: 分析了直流输电系统整流侧连接于不同强度交流系统的运行特性, 研究了定电流控制下整流侧的功率输送极限。通过分析功率曲线和换相角曲线, 指出了送端系统在额定电流控制下能够保证稳定运行, 并且发现受换流器换相角的限制, 整流侧系统强度越小, 直流输电系统整流侧的输送能力越弱; 提出了电流调制裕度和短路比之间的关系, 指出了能够保证一定功率提升裕度的送端系统最小短路比。通过进一步分析参数变化对电流调制裕度和短路比之间关系的影响, 指出在相同的短路比下, 换流变压器参数的选取(额定容量和等效电抗等)对送端系统输送功率极限有较大的影响。

关键词: 送端系统; 输送功率极限; 电流调制裕度; 短路比

0 引言

高压直流输电技术由于其具有经济灵活、可控性强等优点, 在大容量、远距离输电方面有明显的优势。随着中国直流输电技术的发展以及“西电东送, 全国联网”战略的实施, 高压直流工程在国内电力输送中发挥着越来越重要的作用^[1-2]。

目前, 国内外针对交直流交互影响的分析认为, 由于受到交流系统的影响, 直流输电系统的输送能力会受所连交流系统强度的限制^[3-7], 交流母线的短路比(SCR)成为评价交流电网电压支撑能力和接受直流功率能力的重要量化指标^[8-9]。对直流系统稳定的研究, 由于只有逆变运行时存在额定运行点的稳定问题, 因此对直流系统的输送功率极限的研究, 均从逆变器的角度进行分析。文献[3]利用受端交直流系统的简化模型, 研究直流输电系统输送功率极限与短路比之间的关系, 从而得出对交流系统强弱的划分标准。直流系统的输送能力在一定程度上也能够表征系统的静态稳定性, 输送能力越强, 直流系统额定运行时的稳定裕度越大, 过负荷能力也越强, 同时有利于直流系统相互之间的功率支援。

与交流系统相比较, 交直流系统在逆变侧的电压稳定性问题受到了更多的关注^[10-12]。文献[13]利用简化的单馈入直流输电系统模型分析了直流系统最大输送功率与换流母线节点电压稳定性之间的关

系。文献[14]针对由于高压直流输电系统低功率运行引起的换流站附近过电压现象, 将受交流测电压控制的换流站与交流系统的无功交换量反馈到整流侧无功优化控制, 使换流器无功调节能力比开环控制更精确, 有助于提高暂态电压稳定性。文献[15-16]针对直流输电系统受端最突出的电压稳定性问题, 提出利用换流器母线上无功功率的变化所导致的母线电压变化率作为评价系统电压稳定性的标准。在不同的运行方式下换流站消耗的无功功率不同, 会导致直流系统功率传输极限和暂态过电压水平的差异^[17]。在直流输电引起的低频振荡问题上, 文献[18]针对局部和区域间频率振荡问题, 应用贯序设计和全局优化的方法, 设计了兼顾本地和广域的直流输电稳定控制器。相比之下, 国内外缺乏对直流输电系统整流侧输送功率能力方面的分析研究。

本文深入分析了整流侧交流系统强度对整流侧运行特性的影响, 发现尽管在额定运行点整流侧不存在稳定问题, 但交流系统强度是决定直流系统最大输送功率的重要因素之一。对于直流系统功率提升要求, 整流侧存在最小短路比。在本文的研究过程中, 为了排除逆变侧对送端系统的扰动, 本文假设逆变侧系统足够强且总能够保证逆变侧稳定运行。

1 送端系统运行特性分析

1.1 送端系统交互作用模型

借鉴传统单馈入交直流系统模型^[12], 建立单送出交直流系统简化模型如图 1 所示。

收稿日期: 2016-12-16; 修回日期: 2017-05-04。

上网日期: 2017-06-27。

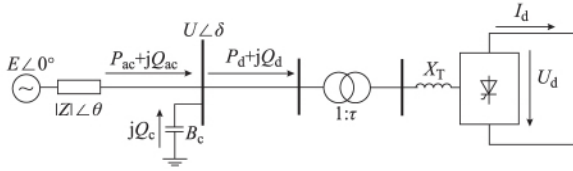


图1 交直流系统相互作用的简化模型
Fig.1 Simplified model with interaction of AC and DC systems

图中： $E\angle 0^\circ$ 为交流系统等值电势； $|Z|\angle\theta$ 为交流系统等值阻抗； P_{ac} 和 Q_{ac} 分别为交流系统有功功率和无功功率； P_d 和 Q_d 分别为直流换流变压器网侧有功功率和无功功率； X_T 为换流变压器等效电抗； $U\angle\delta$ 为换流站交流母线电压； B_c 为交流滤波器和无功补偿电容的等值导纳； U_d 和 I_d 分别为直流电压和直流电流； τ 为换流变压器变比。由于恒定功率控制本质上是定电流控制方式的一种形式，因此本文的研究中，整流器采用恒定电流/最小超前触发角控制方式，逆变侧采用定熄弧角控制/电流偏差控制方式。

交直流系统连接母线的短路比定义为换流站交流母线的短路容量与额定直流功率的比值^[5]，如式(1)所示。

$$R_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_{dN}} = \frac{U_N^2}{P_{dN}} \frac{1}{|Z|} \quad (1)$$

式中： S_{ac} 为换流母线的短路容量； P_{dN} 为额定直流功率； U_N 为换流母线的额定电压。

如果取换流站交流母线的额定电压为交流系统电压的基准值，额定直流功率为功率的基准值，则短路比还可以表示为：

$$R_{SCR} = \frac{1}{|Z_{pu}|} \quad (2)$$

式中： $|Z_{pu}|$ 为 $|Z|$ 的标么值。

1.2 基本方程

基于图1的系统交互作用模型，交流系统基准值不变，取额定直流功率 P_{dN} 和额定直流电压 U_{dN} 分别为直流系统的基准功率和基准电压^[3]，并且假设逆变侧所连交流系统足够强大，能够保证逆变侧换流母线电压为额定值，则整流侧模型系统定电流控制的运行特性可表示为：

$$P_d = C U^2 (\cos 2\alpha - \cos(2\alpha + 2\mu)) \quad (3)$$

$$Q_d = C U^2 (2\mu + \sin 2\alpha - \sin(2\alpha + 2\mu)) \quad (4)$$

$$I_d = K U (\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)) \quad (5)$$

$$U_d = \frac{P_d}{I_d} \quad (6)$$

$$P_{ac} = \frac{E U \cos(\delta + \theta) - U^2 \cos \theta}{|Z|} \quad (7)$$

$$Q_{ac} = \frac{E U \sin(\delta + \theta) - U^2 \sin \theta}{|Z|} \quad (8)$$

$$Q_c = B_c U^2 \quad (9)$$

$$P_d - P_{ac} = 0 \quad (10)$$

$$Q_d - Q_{ac} - Q_c = 0 \quad (11)$$

$$I_d = \frac{a U \cos \alpha - b U_i \cos \gamma}{X_d} \quad (12)$$

式中： Q_c 为无功补偿容量； α 为触发延迟角； μ 为换相角； C 和 K 分别为与整流侧换流变压器参数及与直流系统基准值有关的两个常数； a 和 b 为常数，表示通过换流器转换后的比例； U_i 为受端换流母线电压； γ 为受端逆变站熄弧角； X_d 为直流输电线路阻抗。

C 的表达式为：

$$C = \frac{3 S_T}{4\pi P_{dN}} \frac{1}{X_c \tau^2} \quad (13)$$

式中： S_T 为换流变压器容量； X_c 为换流变压器等效电抗。

K 的表达式为：

$$K = \frac{\pi}{6 X_r} \quad (14)$$

式中： X_r 为换流器等效电抗。

式(12)说明整流站通过控制直流电流来影响整流侧的触发延迟角，达到定电流的控制作用。若不考虑变压器分接头的改变和补偿电容器的投切，则与换流站设备相关的参数(K, B_c, a, b)可以认为是固定的。而送端交流系统一旦运行方式确定，则送端系统参数也是固定的。也就是说在运行过程中，如果交流系统等效阻抗 $|Z|$ 确定了，等值电势 E 也是确定的。

1.3 运行特性分析

假设受端系统足够强，使得受端换流器的熄弧角始终能够维持在额定值(一般为 18°)运行。这样一来，整流侧运行状态变量共有 11 个，而约束方程是 10 个，因此只有一个状态变量是独立的。即一旦确定其中的任何一个变量，其余变量也随之而定。所以可以通过控制 I_d 的大小，得到其余变量随 I_d 变化的曲线。

在直流电流增大的过程中，如果整流站触发延迟角达到下限(一般设定 α_{min} 为 5°)，表明在稳态运行时，整流站设定的电流值不能再升高，否则当直流输电系统出现小扰动，整流站和逆变站均需要切换运行模式。

在下述分析中，为了展现整流站触发延迟角达到下限之后直流电流再增加时的运行状况，假设换流器控制方式转换为定最小触发角控制方式，逆变

站换流器控制方式转换为电流偏差控制。此时整流侧的运行特性可由式(3)至式(11)来描述,运行状态变量共有10个,而约束方程是9个,依然可以得到其余变量随 I_d 变化的曲线。

为了计算方便,下面将在上述基准值下的标幺值系统中进行分析说明。借鉴较为常规的换流变压器参数的取值, $S_T = 1.15P_{dN}$, $X_c = 0.18$, $\tau = 1$,经式(13)计算得到 C 值为1.53,另外取交流系统等值阻抗角 θ 为 90° 。当整流站运行在额定状态时,应有 $I_d = 1$, $U = 1$, $P_d = 1$,同时取 $Q_{cN} = Q_{dN}$,其中 Q_{cN} 为额定无功补偿容量, Q_{dN} 为额定直流无功功率。因此可由式(12)确定额定延迟触发角 α_N ,由式(3)确定额定换相角 μ_N ,再分别确定常数 K , B_c 和 E ,其中 $E = \sqrt{|Z|^2 + 2|Z|\cos\theta + 1}$ 。由式(2)得到交流系统等效阻抗与短路比成反比的关系,可以用来表征交流系统的强度。

求解由式(3)至式(12)组成的非线性方程组,得到正常工作状况下 α 取不同值时,状态变量 U , Q_d , P_d 随 I_d 的变化规律,见附录A。

对于整流侧,当系统运行于 $dP_d/dI_d > 0$ 时,增大系统的直流电流可以增大输送的直流功率;而当系统运行在 $dP_d/dI_d < 0$ 时,增大直流电流,会造成换流母线电压急剧下降,系统输送的直流功率反而减小,系统难以稳定运行。 $dP_d/dI_d = 0$ 的点均出现在整流器切换到最小 α 的控制后,该点对应的 I_d 大小受整流侧短路比和 α_N 的影响。相同短路比情况下, α_N 越小, $dP_d/dI_d = 0$ 所对应的 I_d 越大,但 P_d 越小。

2 整流侧输送功率极限与短路比的关系

为了研究整流侧短路比对输送功率的影响,考察整流站的输送功率 P_d 随电流的变化过程(当触发角达到 5° 时切换为最小触发角控制方式)和换相角随电流的变化过程,如图2所示,其中,整流站额定延迟触发角 α_N 取 15° 。整流侧输送功率 P_d 的最大值(用 P_{max} 表示)与短路比的关系见附录B。

观察图2可得结果如下。

1) 整流侧额定运行点总处于功率曲线的上升沿,见图2(a),即出现在定电流控制过程的稳定运行区域。这是由于整流侧额定运行时采用定功率或者定电流控制,通过调节触发角 α 的大小来实现电流控制,额定运行时系统的触发角 α 均留有一定裕度。

2) 由于实际工程中常见的十二脉动换流器对换相角 μ 的通常要求是不超过 30° ^[19],当换相角大于 30° 小于 60° 时,双桥换流器一直存在换相的单桥,交

替出现5个阀同时导通和6个阀同时导通,而进入不稳定状态。图2(b)中,黄虚线下方表示定电流控制,上方表示最小触发角控制。从图2(b)中发现换相角 μ 达到 30° 时总是处在定电流控制,并且达到 30° 时的运行点在额定运行点的右侧,说明在定电流控制方式下额定运行时,系统总是稳定的。

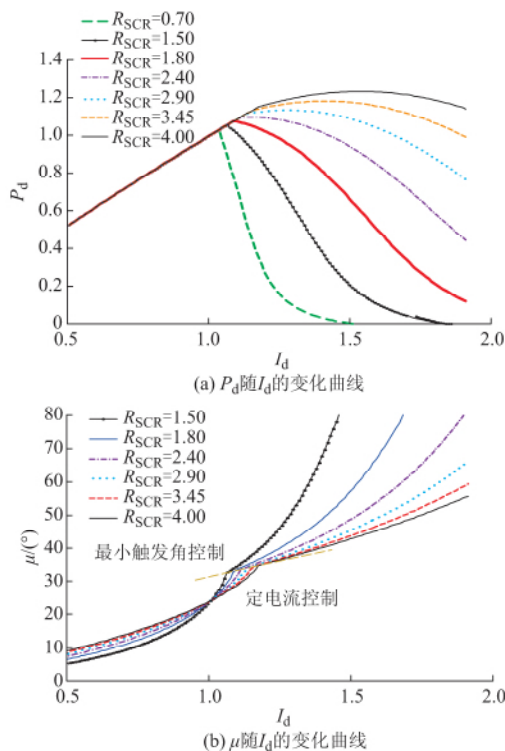


图2 整流侧运行特性曲线

Fig.2 Operation characteristic curves at rectifier side

3) 由图2(a)和(b)可以发现,最大功率点对应的直流电流值总是大于 $\mu = 30^\circ$ 时对应的直流电流值,因此,整流侧直流电流的调制范围主要受换相角不能过大的条件制约。

由上述分析可知,在不同的短路比下,整流侧在额定工作点运行时系统总是稳定的。然而,直流系统需要有一定的过负荷能力,通过对整流侧电流调制来实现短时提高直流系统输送功率的能力。由于换流器的换相角 μ 正常工作运行点小于 30° ,所以整流侧电流的调整裕度主要受限于换相角 μ ,进而也限制了系统输送的最大功率。

综上所述,本文后续部分采用电流调制裕度(记为 ΔI_d)来表示整流系统稳定运行可输送最大功率对应的电流值(标幺值)与额定电流的差值。由于对应于较大 α_N 值时的直流电流的调整裕度大于对应于较小 α_N 值的电流调整裕度,因此取 $\alpha_N = 20^\circ$,研究整流侧短路比与调制电流最大值 I_{dm} 之间的关系,见表1。

表 1 整流侧短路比与调制电流最大值的关系
Table 1 Relationship between SCR and maximum modulation current at rectifier side

短路比	P_{dm}	I_{dm}	短路比	P_{dm}	I_{dm}
1.15	1.071 4	1.075	2.92	1.142 7	1.140
1.26	1.081 5	1.080	3.45	1.163 2	1.160
1.82	1.101 9	1.100	4.00	1.173 4	1.170
2.37	1.122 3	1.120	4.50	1.183 6	1.180
3.60	1.148 0	1.167	5.00	1.193 9	1.190

从而可得电流调制裕度与整流侧短路比的关系见附录 B。为保证实际运行中,长期运行系统的直流输电能力可有 10% 的有功功率提升空间,整流侧输送功率极限与送端系统短路比的关系需满足:

$$P_{dm}(R_{SCR}) \geq 1.1P_{dN} \quad (15)$$

对于典型系统,能够保证 10% 功率提升能力的送端系统的最小短路比在 1.6 左右。

3 参数对输送功率与短路比关系的影响

从送端系统定电流控制的运行特性方程(式(3)至式(12))分析得出,与送端系统有关的几个主要参数分别是整流侧等效阻抗角 θ 、常数 C 和额定延迟触发角 α_N 。

3.1 单个参数变化

通过分析比较 θ, C, α_N 分别变化时^[10],对整流站电流调制裕度与短路比关系的改变,来说明系统参数对整流侧输送功率与短路比关系的影响,具体关系见附录 C。根据实际情况,以整流侧阻抗角在典型值 84° 附近变化为例,得到如下结果。

1)在不同的等效阻抗角 θ 下,如果需要较大的电流调制裕度,则要求整流侧有较大的短路比。当电流调制量相同时,如果增大等效阻抗角 θ ,即减小了交流系统消耗的等效有功功率,增加了发出的无功功率,此时需要的短路比会减小。

2)整流站设备参数 C 较小时,增大电流调制裕度对送端系统具有较大短路比的要求比参数 C 比较大时更加强烈。所以,想要输送更多的功率,使整流站设备参数 C 越大越好,也就是说换流变压器的额定容量越大、等效电抗越小越好。

3)不同的额定延迟触发角 α_N 对 ΔI_d 与短路比变化趋势的影响很小。如果增大额定延迟触发角 α_N ,对于控制相同的 ΔI_d ,所需要的送端系统短路比较小,其原因之一是换相角达到限制值的裕度变大了。所以在条件允许的情况下,保证较大的额定延迟触发角 α_N 就能够输送更多的功率。

3.2 参数之间的相互影响

由上文可知,与送端系统有关的几个主要参数中,整流站设备参数 C 对 ΔI_d 与短路比的关系的影

响最大。下面主要分析参数 C 分别与系统等值阻抗角 θ 和额定延迟触发角 α_N 在变化过程中对系统短路比与 ΔI_d 关系的影响,如附录 D 所示,可得结论如下。

1)如果技术水平能够使得参数 C 在 2.0~2.2 之间,此时提升系统等值阻抗角 θ 所能输送的功率要大于增大系统参数 C 所能输送的功率。表 2 中列出的是当 ΔI_d 为 1.12 时,参数 C 和 θ 对系统短路比的影响情况。

表 2 参数 C 和 θ 与系统短路比的关系
Table 2 Relationship between C, θ and SCR

C	$\theta/(^\circ)$	短路比	C	$\theta/(^\circ)$	短路比
1.40	80	3.700	2.00	80	1.800
1.40	82	3.600	2.00	82	1.754
1.40	84	3.510	2.00	84	1.730
1.40	86	3.450	2.00	86	1.700
1.40	88	3.360	2.00	88	1.654
1.40	90	3.300	2.00	90	1.625
1.53	80	2.700	2.20	80	1.650
1.53	82	2.650	2.20	82	1.633
1.53	84	2.600	2.20	84	1.605
1.53	86	2.541	2.20	86	1.574
1.53	88	2.495	2.20	88	1.550
1.53	90	2.435	2.20	90	1.510

2)如果技术条件能够使得参数 C 在 2.0~2.2 之间,电流调制裕度不超过 0.22 左右,为了传输较大的功率,此时选择提高额定延迟触发角 α_N 要优于选择增大系统参数 C 。

上述结论与 1.3 节中确定送端系统参数(等效阻抗角 θ 、参数 C)后,得到的运行特性曲线中 α_N 变量的变化情况相同(见附录 A),验证了分析和研究输送功率极限方法的正确性。

综上所述,为了使电流调制裕度较大,提高送端系统的输送功率极限,应提高整流站的设备参数 C ,即提高和改善换流变压器参数,其次是保证较大的额定延迟触发角 α_N 和送端交流系统等值阻抗角 θ 。

4 结语

本文通过分析直流输电系统整流站的控制方式和简化模型,建立了整流侧运行特性方程,得到状态变量 U, Q_d, P_d 随 I_d 的变化规律曲线,分析了直流输电系统整流侧的运行特点。

本文发现在定电流控制时,只要送端交流系统强度不过小(小于 1),整流侧在额定运行点总是稳定的,但是受限于实际工程中对换流站换相角的要求,整流侧的输送功率能力不能无限提升。针对这一问题,通过整流站的电流调制裕度来反映送端系统输送功率极限,并且指出为了保证系统长期运行

时10%的直流功率提升空间,需要送端系统满足相应的最小短路比要求。进而,分析比较了系统参数(整流站设备参数 C 、整流侧等效阻抗角 θ 和额定延迟触发角 α_N)的改变对不同电流调制裕度下交流系统强度要求的影响,指出换流变压器参数的选取对送端系统输送功率极限有较大的影响。

本文的研究成果对交直流送端系统运行状态的研究以及交直流系统规划阶段确定其额定运行功率的大小有指导意义。在本文理论研究的基础上,可基于实际工程设备运行参数和调度控制的要求,指出直流系统所能接入的送端交流系统强度的大小,从而确定交直流送端系统的输送功率极限。更进一步,未来需要分析多送出交直流系统运行特性,考虑多直流系统间的相互影响,给出更全面和具体的输送功率极限参考指标。

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

参考文献

- [1] 郭小江,卜广全,马世英,等.西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略[J].电网技术,2009,33(2):56-61.
GUO Xiaojiang, BU Guangquan, MA Shiyang, et al. System stability control strategy for multi-send & multi-infeed HVDC project from southwest hydropower stations to east China power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 56-61.
- [2] AN Ting, HAN Congda, WU Yanan, et al. HVDC grid test models for different application scenarios and load flow studies [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(2): 262-274.
- [3] 徐政.联于弱交流系统的直流输电特性研究之一——直流输电的输送能力[J].电网技术,1997,21(1):12-16.
XU Zheng. Characteristics of HVDC connected to weak AC systems; Part one HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [4] 赵晓君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004:106-112.
- [5] 李兴源.高压直流输电系统的运行和控制[M].北京:科学出版社,1998:153-155.
- [6] KUNDER P. Power system stability and control[M].北京:中国电力出版社,2002:351-354.
- [7] 邵瑶,汤涌.多馈入交直流混合电力系统研究综述[J].电网技术,2009,33(17):24-30.
SHAO Yao, TANG Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [8] CIGER Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed [R]. 2008.
- [9] 洪潮,饶宏.多馈入直流系统的量化分析指标及其应用[J].南方电网技术,2008,2(4):37-41.
HONG Chao, RAO Hong. The index parameters for analyzing multi-infeed HVDC systems and their applications[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 37-41.
- [10] DENIS L H A, ANDERSSON G. Impact of dynamic modeling on power system of HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 1427-1437.
- [11] DENIS L H A, ANDERSSON G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [12] 林伟芳,汤涌,卜广全.多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J].中国电机工程学报,2008,28(31):1-8.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [13] 邱革非,束洪春,董俊,等.联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究[J].昆明大学学报(理工版),2005,30(3):50-55.
QIU Gefei, SHU Hongchun, DONG Jun, et al. Analysis of power transmission capability and voltage stability of HVDC system connected to weak AC system[J]. Journal of Kunming University (Science and Technology), 2005, 30(3): 50-55.
- [14] 汪娟娟,梁泽勇,李子林,等.高压直流输电系统低功率运行的无功控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(6):154-158.DOI: 10.7500/AEPS20160913005.
WANG Juanjuan, LIANG Zeyong, LI Zilin, et al. Reactive power control strategy for low power operation of HVDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 154-158. DOI: 10.7500/AEPS20160913005.
- [15] HAMMAD A E, KVHN W. A computation algorithm for assessing voltage stability at AC/DC interconnections [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1986, 1(1): 209-216.
- [16] FRANKEN B. Analysis of HVDC converters connected to weak AC systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(1): 235-242.
- [17] 王鹏飞,张英敏,李兴源,等.基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):74-78.
WANG Pengfei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan, et al. Interaction analysis of AC/DC systems based on multi-infeed effective short circuit ratio[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 74-78.
- [18] LI Yong, LIU Fang, CAO Yijia. Sequential design and global optimization of local power system stabilizer and wide-area HVDC stabilizing controller [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 292-299.
- [19] 戴熙杰.直流输电基础[M].北京:水利电力出版社,1990.

李欣蔚(1993—),女,硕士研究生,主要研究方向:交直流混合系统稳定与控制。E-mail: 461426782@qq.com

刘崇茹(1977—),女,通信作者,博士,教授,主要研究方向:交直流混合系统分析、仿真、运行与控制。E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn

韩玉蓉(1991—),女,硕士,主要研究方向:交直流混合系统稳定与控制。E-mail: hanyrong@163.com

(编辑 万志超)

(下转第 141 页 continued on page 141)

- [23] LU K, NGUANG S K. Design of auto-tuning capacitive power transfer system for wireless power transfer[J]. International Journal of Electronics, 2015, 103(9): 1430-1445.
- [24] SU Y G, ZHOU W, HU A P, et al. A shared channel design for the power and signal transfers of electric-field coupled power transfer systems[J]. Journal of Power Electronics, 2016, 16(2): 805-814.
- [25] LIU C, HU A P, COVIC G A, et al. Comparative study of CCPT systems with two different inductor tuning positions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(1): 294-306.

谢诗云(1987—),男,博士研究生,主要研究方向:无线电能传输及其应用、电力电子技术及其应用。E-mail: yunshixie@qq.com

苏玉刚(1962—),男,通信作者,博士,博士生导师,主要研究方向:无线电能传输及其应用、电能变换与控制技术、控制理论与自动化系统集成。E-mail: su7558@qq.com

陈 龙(1989—),男,博士研究生,主要研究方向:无线电能传输及其应用、电力电子技术及其应用。E-mail: 365852249@qq.com

(编辑 万志超)

Constant-voltage Electric-field Coupled Wireless Power Transfer System Based on Double-sided F-LCLC Networks

XIE Shiyun¹, SU Yugang^{1,2}, CHEN Long¹, ZHAO Yuming¹, TANG Chunsen¹

(1. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400030, China)

Abstract: An electric-field coupled wireless power transfer (ECWPT) system employs a high-frequency electric-field as energy medium to transfer power wirelessly. For applications where constant voltage is required, an ECWPT system with double-sided F-LCLC resonant networks is proposed to maintain the output voltage against the variation of load resistance and guarantee system operation in zero-phase angle all the time. The condition resulting in load-independent output voltage is given based on an analysis of transmission characteristics of forward and opposite F-LCLC resonant networks. And the F-LCLC resonant network design is investigated under constraints on the inductance, total harmonic distortion and parameter sensitivity. On this basis, a parameter design method for the system is presented. Finally, the transfer characteristics and the design method are validated by simulation and experiment.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477020) and International Science and Technology Cooperation Base Projects of Chongqing (No. CSTC2015GJHZ40001).

Key words: wireless power transfer; electric-field coupled; constant voltage output; resonant network

(上接第 105 页 continued from page 105)

Effect of Sending-end System on Maximum Transmission Power of AC/DC System

LI Xinwei¹, LIU Chongru¹, HAN Yurong², WANG Lili¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250012, China)

Abstract: The operation characteristics of the high-voltage direct current (HVDC) rectifier connected to AC system with different strengths are analyzed, and the maximum transmission power of the rectifier under current control is pointed out. Through the analysis of the power curve and overlap angle curve, it is indicated that the rectifier side is always stable when the HVDC system is under the rated operating condition. However, the maximum transmission power of the rectifier is limited by the strength of the connecting AC system, under the restriction of overlap angle in the converter. The relationship between the current modulation margin and short circuit ratio (SCR) of the sending-end system is proposed. Also, the minimum SCR of the sending-end AC system is proposed which is necessary for the connecting rectifier to increase the maximum active power. Furthermore, the effect of parameters of the rectifier on the direct current modulation margin and the SCR of the sending-end AC system are discussed. The choice of the parameters of converter transformer (nominal capacity and equivalent reactance, etc) can largely affect the maximum transmission power under the same SCR.

Key words: sending-end system; maximum transmission power; current modulation margin; short circuit ratio