

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

徐 政

浙江大学电机系, 310027 杭州

CHARACTERISTICS OF HVDC CONNECTED TO WEAK AC SYSTEMS

PRAT1: HVDC TRANSMISSION CAPABILITY

Xu Zheng

Zhejiang University

Hangzhou 310027, China

ABSTRACT Through the analysis of the simplified AC/DC interconnected system model, the transmission capabilities of HVDC systems connected to weak AC systems have been studied in detail. The concepts and their computation algorithm of the maximum power curve, the maximum available power, the critical short circuit ratio and the boundary short circuit ratio are discussed. The strength classification of the connected AC systems according to the critical short circuit ratio and the boundary short circuit ratio is proposed in this paper.

KEY WORDS HVDC Weak AC system Transmission power limit Short circuit ratio

摘要 本文通过对交直流系统相互作用的模型系统的分析, 对联于弱交流系统的直流输电的输送功率特性作了研究, 详细讨论了最大功率曲线、最大可送功率、临界短路比和边界短路比的概念和算法, 并提出了划分交流系统强弱的一种准则。

关键词 直流输电 交流弱系统 功率极限 短路比

1 引言

设计直流输电系统时, 必须考虑直流输电固有的一些动态特性, 如换相失败、短时过电压、低频谐振、电压及功率不稳定等。而决定所有这些动态特性的根本因素是所联交流系统的强度, 它表现为两个方面: 一为换流器接入点交流系统的等值阻抗; 二为交流系统的机械惯性或旋转惯量。对联结于弱交流系统的直流输电特性的研究, 始自最早的直流输电工程。近

十年来, CIGRE 和 IEEE 专门组成了联合工作小组对此问题开展研究^[1]。本系列文章结合笔者的研究心得, 试图对此问题作一些探讨。

2 系统模型

对交直流系统相互作用机理的分析, 采用图1所示的模型系统比较方便。图1中, 交流系统采用了戴维南等值电路, 即用一固定阻抗 Z 串联一固定电势 E 来模拟。计算等值阻抗 Z 时, 发电机用暂态电抗 $X'_{d\tau}$ 表示。这个模型对应于扰动发生后 100~300ms 内交流系统的特性, 此时同步发电机的励磁

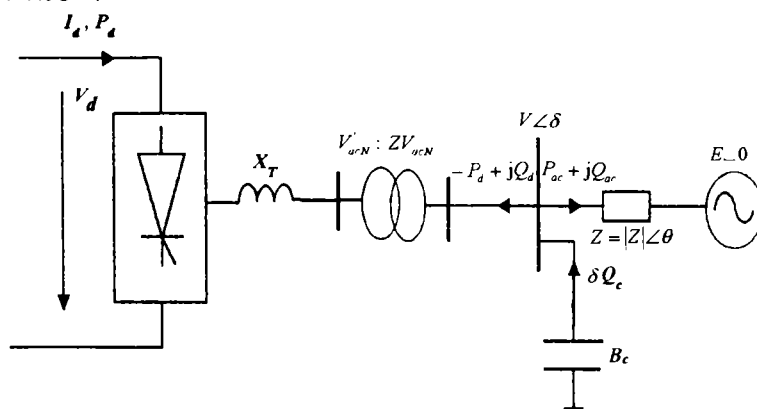


图1 交直流系统相互作用的简化模型

Fig. 1 A simplified model of an HVDC converter connected to an AC network

V_d/I_d : 直流电压和电流; $V\angle\delta$: 换流站交流母线电压;
 P_d/Q_d : 直流有功和无功; P_{ac}/Q_{ac} : 交流有功和无功;
 X_T : 换流变压器漏抗; B_c : 交流滤波器和无功补偿电容的等值导纳;
 $|Z|\angle\theta$: 交流系统等值阻抗; τ : 换流变压器分接头;
 $E\angle 0$: 交流系统等值电势。

调节器和交流系统的其它电压控制装置还未来得及响应。另外,图1中的所有交流量只计及其基波分量。由于上述原因,图1所示系统模型一般适用于小扰动或似稳态过程的分析。如果让图1中的交流等值电势 E 可变,则可近似计及交流系统的电压调节特性。同样,如果让并联导纳 B_c 可变,还可计及静止无功补偿器的作用。这种情况下,可以扩大图1所示系统模型的适用范围。由于逆变运行时,直流输电对交流系统强度的要求更为突出,因此在以下的分析中,本文假定模型系统中的换流器为逆变器。

3 短路比

在图1所示的模型系统中,对等值阻抗 Z 的另一种表达方式是短路比的概念。短路比定义为换流站交流母线的短路容量 S_{SC} 与额定直流功率 P_{dN} 的比值,即

$$SCR = \frac{S_{SC}}{P_{dN}} = \frac{V_N^2}{P_{dN}} \cdot \frac{1}{|Z|} \quad (1)$$

如取图1交流系统的基准电压为换流站交流母线电压额定值 U_N ,基准功率取额定直流功率 P_{dN} ,则交流系统的基准阻抗 $Z_{b,ac}$ 即为 U_N^2/P_{dN} ,从而短路比SCR还可表达为

$$SCR = \frac{1}{|Z|/Z_{b,ac}} = \frac{1}{|Z_{pu}|} \quad (2)$$

即与等值阻抗的标么值 $|Z_{pu}|$ 成倒数关系。

为了同时考虑等值阻抗 Z 和换流站交流滤波器及无功补偿电容器的作用,引入了有效短路比的概念。有效短路比定义为

$$ESCR = \frac{S_{SC} - Q_{CN}}{P_{dN}} \quad (3)$$

式中 Q_{CN} 为当换流站交流母线电压 U 取额定值时,由交流滤波器和无功补偿电容器所产生的无功功率。若仍取上述的交流系统基准值,则ESCR还可表达为

$$ESCR = \frac{1}{|Z_{pu}|} - B_{c,pu} \quad (4)$$

4 运行特性分析

若在图1的模型系统中,直流系统的基准功率和基准电压分别取额定直流功率 P_{dN} 和额定直流电压 U_{dN} ,交流系统的基准值取法仍如上述方法,则整个模型系统的特性可用如下9个方程来描述:

$$P_d = CU^2[\cos 2\gamma - \cos(2\gamma + 2\mu)] \quad (5)$$

$$Q_d = CU^2[2\mu + \sin 2\gamma - \sin(2\gamma + 2\mu)] \quad (6)$$

$$I_d = KU[\cos \gamma - \cos(\gamma + \mu)] \quad (7)$$

$$U_d = P_d/I_d \quad (8)$$

$$P_{ac} = \frac{1}{|Z|}[U^2 \cos \theta - EU \cos(\delta + \theta)] \quad (9)$$

$$Q_{ac} = \frac{1}{|Z|}[U^2 \sin \theta - EU \sin(\delta + \theta)] \quad (10)$$

$$Q_c = B_c U^2 \quad (11)$$

$$P_d - P_{ac} = 0 \quad (12)$$

$$Q_d + Q_{ac} - Q_c = 0 \quad (13)$$

式中 γ 为关断余裕角, μ 为换相角, C 和 K 为与换流变压器参数及与直流系统基准值有关的两个常数,其中 C 的表达式为

$$C = \frac{3}{4\pi} \cdot \frac{S_T}{P_{dN}} \cdot \frac{1}{U_k\%} \cdot \frac{1}{\tau^2} \quad (14)$$

式中 S_T 和 $U_k\%$ 分别为换流变压器的容量和短路比。

将上述方程中的变量分类如下:

换流站设备参数: $S_T, U_k\%, C, K, B_c, \tau$

受端系统参数: $|Z|, \theta$

运行状态变量: $\gamma, \mu, U_d, I_d, P_d, Q_d,$

$U, \delta, P_{ac}, Q_{ac}, Q_c, E$

若不考虑变压器分接头的改变和补偿电容器的投切,则换流站设备参数可以认为是固定的。而受端交流系统一旦运行方式确定,则受端系统参数也是固定的。在运行状态变量中,等值电势 E 也假定是固定的。这种情况下,运行状态变量共有11个,而约束方程是9个,因此只有2个状态变量是独立的。即一旦确定其中的任何2个变量,其余变量也随之而定。根据不同的分析目的,可以对2个独立变量进行不同的选择。在以下的分析中,选择 γ 和 I_d 的独立变量。当 γ 取定值而改变 I_d 的大小时,可以得到其余变量随 I_d 变化的曲线。下面考察 P_d, Q_d, U 和 μ 随 I_d 变化的规律。为此,首先必须假定换流站设备参数和受端系统参数。一般换流变压器参数的变化范围为 $S_T = (1.1 \sim 1.2)P_{dN}, U_k\% = 15\% \sim 20\%, \tau = 1 - 15\% \sim 1 + 15\%$ 。无功补偿容量的变化范围为 $Q_{CN} = (0.5 \sim 0.6)P_{dN}$ 。因此在以下的分析中,暂取换流站设备参数为固定值如下: $S_T = 1.15P_{dN}, U_k\% = 18\%, \tau = 1, Q_{CN} = Q_{dN}$ 。受端系统参数先取 $|Z| = 1/3$,即短路比SCR为3, $\theta = 90^\circ$ 加以考虑。

根据上述交直流系统的基准值取法,当系统运行于额定状态时,应有 $\gamma = \gamma_n, V = 1, P_d = 1, I_d = 1$ 。因此由方程(5)确定 μ_n ,由方程(7)确定常数 K ,由方程(6)和(11)确定 B_c ,而由方程(12)

和 (13) 确定 E 。保持这个 E 不变, 对于给定的 γ 和 I_d , 求解由方程 (7)、(12) 和 (13) 组成的非线性方程组, 可以求出状态变量 V 、 δ 和 μ , 从而可以确定其余所有状态变量。通过这个方法, 可以画出 γ 给定时, 任何状态变量随 I_d 变化的曲线。图2到图5分别列出了 γ 取不同值时的状态变量 P_d 、 Q_d 、 V 和 μ 随 I_d 变化的曲线。

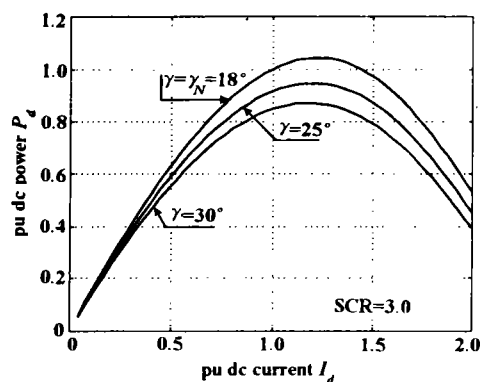


图2 P_d 随 I_d 变化的曲线
Fig. 2 Curves of P_d versus I_d

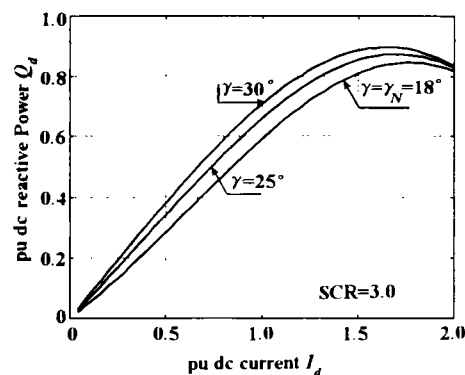


图3 Q_d 随 I_d 变化的曲线
Fig. 3 Curves of Q_d versus I_d

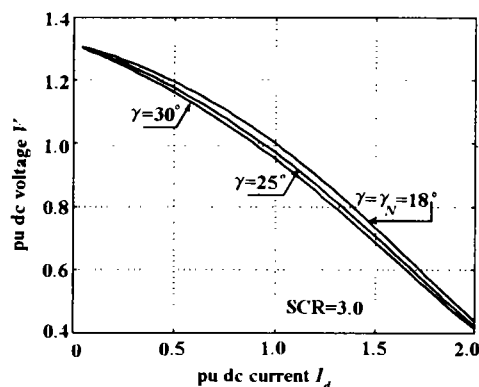


图4 U 随 I_d 变化的曲线
Fig. 4 Curves of U versus I_d

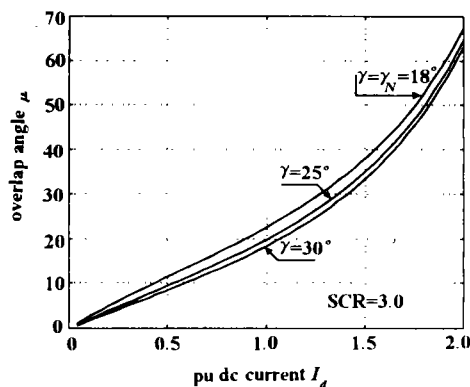


图5 μ 随 I_d 变化的曲线
Fig. 5 Curves of μ versus I_d

从图2可以看出, 对应于较小 γ 值的 P_d/I_d 曲线高于对应于较大 γ 值的 P_d/I_d 曲线。因此, 定义当 γ_N 取 γ_{min} 时的 P_d/I_d 曲线为最大功率曲线^[1], 并定义最大功率曲线上的最高点为最大可送功率点^[1]。

考察图3到图5可以发现, γ 越大, 消耗的无功 Q_d 也越大, 换流站交流母线电压 U 越低, 同时换相角 μ 也越小。

5 输送功率极限与短路比的关系

由于最大可送功率只可能在最大功率曲线上取得, 因此这里重点考察最大功率曲线与 SCR 的关系。为此设定 $\gamma = \gamma_N = \gamma_{min} = 18^\circ$, 利用上节所述的方法, 容易得到 SCR=1.5 和 SCR=4.5 两种情况下的最大功率曲线如图6和图7所示。其中实线对应于系统阻抗角 $\theta = 90^\circ$, 虚线对应于 $\theta = 70^\circ$ 。图6和图7中还同时画出了换相角 μ 随 I_d 变化的曲线。

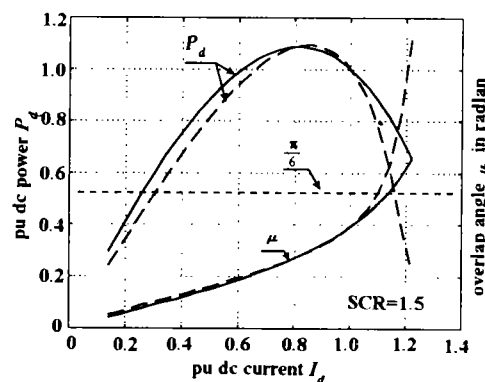
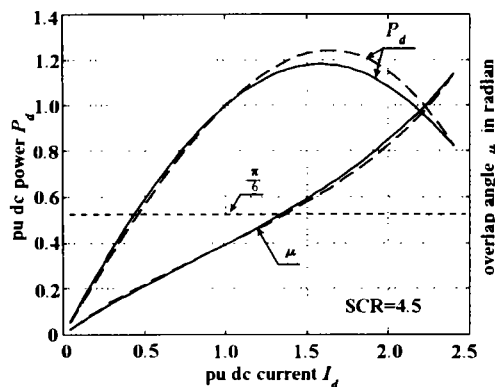


图6 短路比1.5时的 P_d/I_d 曲线
Fig. 6 Curves of P_d versus I_d When SCR is 1.5

按受端系统短路比 SCR 从小到大分别考察图6、图2和图7, 可以发现如下几点:

图7 短路比4.5时的 P_d/I_d 曲线Fig. 7 Curves of P_d versus I_d when SCR is 4.5

(1) 当 SCR 较小时, 额定工作点位于最大可送功率点的右边, 即位于最大功率曲线上 $\frac{dP_d}{dI_d} < 0$ 段; 而当 SCR 较大时, 额定工作点位于最大可送功率点的左边, 即位于 $\frac{dP_d}{dI_d} > 0$ 段。

(2) 当 SCR 较小时, 达到最大功率点所对应的 I_d 总是小于换相角 μ 达到 30° 时所对应的 I_d , 即按 I_d 从小到大, 最大功率点先出现, μ 等于 30° 点迟出现; 而对于较大的 SCR, μ 等于 30° 点先出现, 最大功率点迟出现。

根据上述第 (1) 点可以推断, 当 SCR 等于某个临界值时, 最大可送功率点必与额定工作点重合, 这里称这个 SCR 值为临界短路比, 记作 CSCR^[1], 同时定义相应的有效短路比为临界有效短路比, 记作 CESCR^[1]。根据临界短路比的性质, CSCR 必满足如下方程:

$$\left. \frac{dP_d}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} = 0 \quad (15)$$

根据方程 (15) 和上节所述的系统特性方程, 容易导出临界短路比 CSCR 为如下二次方程之正根:

$$a_0 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_2 = 0 \quad (16)$$

其中

$$a_0 = \left. \frac{dU}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} \quad (17)$$

$$a_1 = 2(Q_{dN} - B_c) \sin \theta \left. \frac{dU}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} + 2C \sin \theta [1 - \cos(2\gamma_N + 2\mu_N)] \left. \frac{d\mu}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} \quad (18)$$

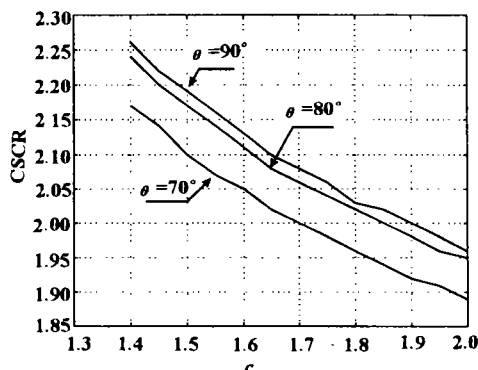
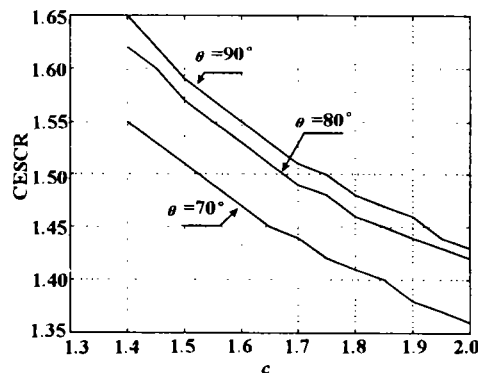
$$a_2 = [(Q_{dN} - B_c)^2 - 1] \left. \frac{dU}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} + 2(Q_{dN} - B_c)C[1 - \cos(2\gamma_N + 2\mu_N)] \left. \frac{d\mu}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} \quad (19)$$

$$\text{而 } \left. \frac{dU}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} = \frac{2C \cos(\gamma_N + \mu_N)}{2C \cos(\gamma_N + \mu_N) - K} \quad (20)$$

$$\left. \frac{d\mu}{dI_d} \right|_{I_{d=1}} = \frac{1}{K \sin(\gamma_N + \mu_N) - C \sin(2\gamma_N + 2\mu_N)} \quad (21)$$

$$\text{即 } \text{CSCR} = \frac{-a_1 - \sqrt{a_1^2 - 4a_0a_2}}{2a_0} \quad (22)$$

显然, CSCR 由常数 C 、等效无功补偿电容 B_c 及系统等值阻抗角 θ 决定。图8列出了在 $Q_{cN} = Q_{dN}$ 的情况下, 对应不同系统等值阻抗角 θ 时, CSCR 随 C 变化的曲线。当 B_c 变化时, CSCR 跟着变化, 但 CESCR 变化很小。图9列出了 CESCR 随 C 变化的曲线。对于典型的换流站设备参数, 作为估算, 可取 $\text{CSCR} = 2$, $\text{CESCR} = 1.5$ 。

图8 CSCR 与常数 C 的关系Fig. 8 Curves of CSCR versus C 图9 CESCR 与常数 C 的关系Fig. 9 Curves of CESCR versus C

同样, 由上述第 (2) 点也可以推出当 SCR 等于某个值时, 最大功率点所对应的换相角 μ 刚好等于 30° , 可称这个 SCR 值为边界短路比, 记作 CSCR'。对边界短路比, 很难导出其解析表达式, 但利用上节的特性方程, 一旦换流站设备参数及等值系统阻抗角确定, 通过数值计算容易求出 CSCR' 的值。对

于典型的换流站设备参数, $CSCR'$ 约等于3。

由于对12脉动换流器通常要求其换相角 μ 运行于小于 30° 的范围内^[2], 因此对于短路比小于 $CSCR'$ 的系统, 输送功率极限就等于最大可送功率, 而对短路比大于 $CSCR'$ 的系统, 输送功率极限不等于最大可送功率, 而与换相角 μ 等于 30° 时的输送功率相等。

6 小结

由上述讨论可知, 当系统短路比 SCR 从小到大变化时, 临界短路比 $CSCR$ 和边界短路比 $CSCR'$ 为两个转折点: 当短路比 SCR 小于 $CSCR$ 时, 额定工作点运行于 P_d/I_d 曲线上 $\frac{dP_d}{dI_d} < 0$ 段, 而当 SCR 大于 $CSCR$ 时, 额定工作点运行于 P_d/I_d 曲线上 $\frac{dP_d}{dI_d} > 0$

段; 当 SCR 小于 $CSCR'$ 时, 输送功率极限由最大可送功率点决定, 而当 SCR 大于 $CSCR'$ 时, 输送功率极限决定于 $\mu = 30^\circ$ 时的输送功率。相应于临界短路比和边界短路比, 可将交流系统的强弱划分为

极弱系统: $SCR < 2$ ($CSCR$)

弱系统: $2 < SCR < 3$ ($CSCR'$)

强系统: $SCR > 3$ ($CSCR'$)

7 参考文献

- 1 CIGRE WG 14.07, IEEE WG 15.05. Guide for planning DC links terminating at AC system locations having low short circuit capacities, part 1: AC/DC system interaction phenomena. Electra, 1992; 142: 119-123
- 2 沈谢 AB 著. 华北电力学院直流输电研究室译. 直流输电结线及运行方式. 水利电力出版社, 1979

收稿日期: 1996-07-29.

大型汽轮发电机自并励磁系统技术研讨会在京举行

1996年11月12-14日, 电力部科技司、安生司、中国电机工程学会、成套设备局在北京联合主持召开了“大型汽轮发电机自并励磁系统技术研讨会”。出席会议的有机械部重大装备司、电力部基建司、电规院、国调中心、中电联、网省局、有关电厂、设计院、科研院(所)和制造部门的代表近80人。

会上, 成套局、电科院、水科院、中国电机工程学会、华北电力设计院等单位提出了一些研究报告和资料。镇海、清河、田家庵、大港、北仑港、石洞口二厂、沙角B等火电厂介绍了自并励系统的运行经验, 科研和制造部门介绍了自并励系统的研制和生产情况。

与会代表对大型汽轮发电机自并励系统及其在我国的应用前景进行了热烈讨论, 对在大型汽轮发电机上推荐选用自并励系统, 进一步提高装置的可靠性和性能, 加强管理、提高产品质量, 消化吸收国外的先进技术和经验等方面都有了一致的认识和看法。

大型汽轮发电机采用自并励系统的好处有: (1) 可提高运行可靠性。因为自并励系统是一种静态励磁, 没有旋转部件, 因而可靠性高。据国外报道, 它造成发电机强迫停机率应比交流励磁机励磁系统

的低。(2) 由于它可缩短发电机组的轴系长度, 减少轴承数, 因而它可改善发电机组的轴系稳定性。(3) 可提高电力系统稳定运行水平, 尤其在小干扰情况下, 它配置PSS后, 小干扰稳定水平有明显提高。(4) 自并励系统造价低, 因轴系长度缩短而减少了厂房和基础造价, 而且调整容易, 维护简单, 故障修复时间也短。

会上, 代表们还对励磁系统的安全运行考核、技术监督、基建调试、制定技术等提出了具体建议。

会后, 电力部科技司和安生司联合发文转发了会议纪要, 并提出了如下要求:

1. 在新建或改造工程中, 汽轮发电机励磁系统选型时, 要积极采用自并励磁系统。200MW及以下汽轮发电机自并励磁系统要全部选用国产设备。300MW及以上汽轮发电机自并励磁系统中, 国内已能生产并经运行考验合格的部分也应尽量选用国产设备。

2. 科研及制造部门要认真消化吸收国外的先进技术和经验, 抓紧开展工作, 加速300MW及以上大型汽轮发电机自并励磁系统的国产化进程。

3. 各有关单位应认真加强励磁系统的管理。部将组织制订有关的技术条件和规程。

(科技司 苏竹荆供稿)