

多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性分析

赵 腾¹, 张 焰¹, 叶冠豪², 张 璨², 卫 茹², 朱晨曦¹

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 国网南京市电力公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对多回特高压直流单层接入特高压交流电网、单层接入超高压交流电网及分层接入特高压和超高压交流电网这 3 种模式, 从多馈入短路比、交流系统稳态电压以及直流极限传输功率 3 个角度分析交直流混联系统的稳态特性, 并提出基于自组织临界慢过程的直流极限传输功率分析方法。通过对两回特高压直流馈入的某区域电网进行仿真计算, 验证分析方法的有效性。结果表明在一般情况下, 采用分层馈入模式有助于提高系统的多馈入短路比, 增强交流系统对特高压直流的电压支撑能力。

关键词: 特高压输电; 直流输电; 分层馈入; 交直流混联系统; 多馈入短路比; 稳态电压; 极限传输功率; 自组织临界

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.024

0 引言

特高压直流输电满足了在能源和负荷分布不均条件下进行大规模、远距离、高效率输送电力的客观需求, 在中国大型能源基地的电力外送中发挥了重要作用^[1-2]。随着经济的快速发展以及负荷水平的持续提高, 近年来我国已有多回特高压直流线路投入运行, 有效保障了负荷密集地区的能源供给。特高压直流系统的正常运行必须依托于交流电网的电压支撑, 当多回特高压直流集中落点于受端系统时, 不同直流系统之间的相互影响增加了系统结构及运行的复杂性, 如果受端系统较弱还容易引起换相失败, 限制了特高压直流的输送容量^[3-4]。因此, 科学评价多回特高压直流馈入下交直流混联系统的稳态特性具有重要意义。

多回特高压直流接入交流电网对于交直流混联系统的安全稳定运行提出了极大的挑战。国际大电网会议(CIGRE)在参考短路比概念的基础上, 定义了多馈入短路比 MISCR (Multi-Infeed Short Circuit Ratio) 指标, 用以评价多回直流线路馈入下交直流系统的相对强弱关系^[5]。文献[6]利用 MISCR 对多馈入交直流系统的最大直流功率和电压稳定等问题进行了研究。文献[7]从多馈入直流系统功率稳定性角度出发, 研究了多馈入直流系统功率稳定性与多馈入有效短路比之间的定量关系。文献[8-9]分析了影响 MISCR 的因素, 有助于针对性地提高 MISCR, 提升交流系统对馈入直流的电压支撑作用。上述研究主要面向高压直流单层接入交流电网的场景, 而文献[10]提出了一种特高压直流分层接入交流电网的方式; 文献[11]进一步分析了多端单层馈入和多端分层馈入方式下直流系统的功率传输特性曲线。

上述文献在受端系统对多回直流的电压支撑作用方面进行了研究, 但并未涉及分层接入方式下多回直流馈入对交流系统稳态电压的影响。

本文在分析多回特高压直流不同馈入模式的基础上, 考虑不同直流馈入点之间的相互影响, 从 MISCR、受端系统稳态电压以及直流系统极限传输功率这 3 个角度对多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性进行研究, 并提出了直流系统的极限传输功率分析方法, 最后以两回特高压直流馈入系统为例进行仿真分析, 进一步验证了理论分析的有效性。

1 多回特高压直流分层馈入模式下的系统 MISCR

1.1 MISCR 概念及计算

交流和直流的相互作用在很大程度上取决于交流系统与所连直流系统容量的相对大小, 即短路比指标^[5]。对于有单回直流接入的交直流电网, 可用戴维南等值方法简化为如图 1 所示的形式^[12]。

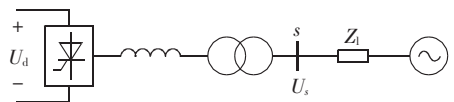


图 1 单回直流馈入下的交直流系统简化模型

Fig.1 Simplified model of AC-DC hybrid system with single-loop DC-infeed

图 1 中, U_d 为直流系统电压; s 为换流母线; U_s 为换流母线电压; Z_i 为交流系统等值阻抗。

定义短路比 K_{SCR} 为直流换流母线的短路容量与直流系统额定功率的比值:

$$K_{SCR} = \frac{S_{ac}}{P_N} = \frac{U_N^2}{P_N |Z_i|} \quad (1)$$

其中, S_{ac} 为从换流母线看出去的系统短路容量; P_N 为系统基准功率; U_N 为换流母线额定电压。

同理, 通过对多端口网络进行等值化简, 可将多回直流馈入下的交直流混联系统简化为如图 2 所示的模型^[13]。

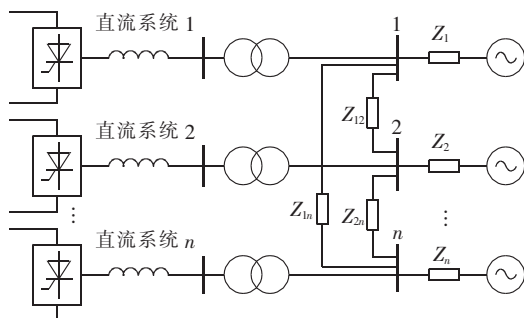


图 2 多回直流馈入下的交直流系统简化模型

Fig.2 Simplified model of AC-DC hybrid system with multi-loop DC-infeed

本文用 i, j 表示直流系统及其所包含的直流线路、换流母线的编号 ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n$), 则 Z_i 表示从第 i 回换流母线看出去的交流系统等值阻抗; Z_{ij} 表示第 i 回换流母线和第 j 回换流母线之间的等值联系阻抗。

CIGRE 定义第 i 回直流线路的 MISC_R 为由其换流母线看出去的交流系统三相短路容量与馈入该点的等效直流功率的比值^[5], 即:

$$MISC_{R_i} = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{U_{iN}^2 / |Z_{eqii}|}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij} / Z_{eqii}| P_{dj}} \quad (2)$$

其中, $MISC_{R_i}$ 为第 i 回直流线路对应的 MISC_R; S_{aci} 为第 i 回直流线路换流母线对应的三相短路容量; P_{deqi} 为考虑了其他直流线路影响的第 i 回直流线路的等值输送功率; P_{di} 为第 i 回直流线路的额定功率; U_{iN} 为第 i 回换流母线的额定电压; Z_{eqij} 为从各换流母线看出去的等值阻抗矩阵 Z_{eq} 的第 i 行、第 j 列元素; Z_{eqii} 为阻抗矩阵 Z_{eq} 的第 i 行、第 i 列元素。

以 U_N 为基准电压, 则用标么值表示的 MISC_R 可化简整理为:

$$MISC_{R_i} = \frac{S_{aci}}{P_{deqi}} = \frac{1}{|Z_{eqii}| P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n |Z_{eqij}| P_{dj}} \quad (3)$$

MISC_R 反映了多馈入交直流混联系统的电网结构强度及电网对换流母线的无功电压支撑能力的大小, 因此对多馈入交直流混联系统的电压稳定具有一定表征作用, MISC_R 越大, 表明电网对换流母线的电压支撑能力越强^[6, 14]。

1.2 多回特高压直流不同馈入模式下的 MISC_R

根据“三华”电网规划方案, 未来几年华北、华中和华东地区将进一步拓展或构建 500 kV 和 1000 kV 交流主网架, 所需区外来电全部通过特高压直流或特

高压交流输入^[1]。为了解决特高压直流馈入过程中的功率分配和转移问题, 有专家提出将多回特高压直流线路采用分层方式馈入受端系统, 相当于将特高压直流分为 2 个容量各占原直流系统一半的直流支路, 分别接入不同电压等级交流电网^[10, 15]。基于上述方案, 本文从单层接入 1000 kV 电网、单层接入 500 kV 电网以及分层接入 1000 kV 与 500 kV 电网这 3 个角度, 对多回特高压直流在不同馈入模式下的 MISC_R 进行分析。由于两回特高压直流馈入的推导相对简洁且能够直观反映 MISC_R 的变化趋势, 因此文中以两回特高压直流馈入为例进行说明。

1.2.1 两回特高压直流单层馈入模式下的 MISC_R

两回特高压直流单层接入 1000 kV 交流电网时的混联系统等值模型如图 3 所示。

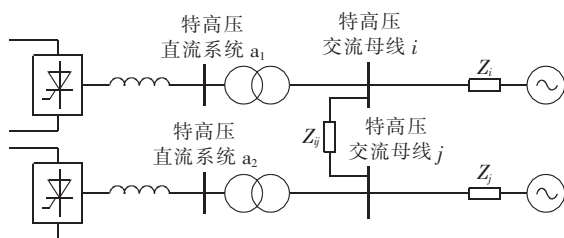


图 3 两馈入特高压直流等值系统

Fig.3 Equivalent system with two UHVDC infeeds

图 3 等值系统中的特高压交流电力网络的节点导纳矩阵 Y 为:

$$Y = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_i} + \frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} \\ -\frac{1}{z_{ij}} & \frac{1}{z_j} + \frac{1}{z_{ij}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(4)求逆, 可得节点等值阻抗矩阵 Z_{eq} 为:

$$Z_{eq} = \frac{1}{z_i + z_j + z_{ij}} \begin{bmatrix} z_i z_{ij} + z_i z_j & z_i z_j \\ z_i z_j & z_j z_{ij} + z_i z_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得式(3)中的等值阻抗为:

$$\begin{cases} Z_{eqii} = \frac{z_i z_{ij} + z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \\ Z_{eqjj} = \frac{z_j z_{ij} + z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \\ Z_{eqij} = Z_{eqji} = \frac{z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, z_i 和 z_j 分别为 1000 kV 换流母线 i 和 j 后的系统等值阻抗; z_{ij} 为换流母线 i 和 j 之间的等值联系阻抗; Z_{eqii} 和 Z_{eqjj} 分别为等值阻抗矩阵中换流母线 i 和 j 对应的自阻抗; Z_{eqij} 为等值阻抗矩阵中换流母线 i 和 j 之间的互阻抗。

两回特高压直流单层接入 500 kV 交流电网时, MISC_R 的计算过程与单层接入 1000 kV 交流电网时相同。令 500 kV 电网中与 1000 kV 电网的 z_i, z_j 及 z_{ij}

相对应的等值阻抗分别为 z'_i, z'_j 和 z'_{ij} , 可得在特高压直流单层接入 500 kV 交流电网情况下换流母线 i 和 j 的自阻抗和互阻抗为:

$$\begin{cases} Z'_{eqii} = \frac{z'_i z'_i + z'_i z'_j}{z'_i + z'_j + z'_{ij}} \\ Z'_{eqjj} = \frac{z'_j z'_j + z'_j z'_i}{z'_i + z'_j + z'_{ij}} \\ Z'_{eqij} = Z'_{eqji} = \frac{z'_i z'_j}{z'_i + z'_j + z'_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

一般情况下, 1000 kV 网络电气联系强于 500 kV 网络, 1000 kV 换流母线的短路容量比 500 kV 换流母线的短路容量大, 且其等值阻抗小, 有:

$$|z'_i| = k_1 |z_i| \quad (8)$$

$$|z'_j| = k_2 |z_j| \quad (9)$$

$$|z'_{ij}| = k_3 |z_{ij}| \quad (10)$$

其中, 等值阻抗比例系数 k_1, k_2, k_3 均大于 1^[10]。

(1) 当 $|z_{ij}| \rightarrow 0$ 时, 即两回直流间的电气距离非常小, 两回直流接入同一落点。根据式(6), 两回特高压直流单层接入 1000 kV 电网时换流母线的自阻抗和互阻抗近似为:

$$Z_{eqii} = Z_{eqjj} = Z_{eqij} = \frac{z_i z_j}{z_i + z_j} \quad (11)$$

根据式(7), 两回特高压直流单层接入 500 kV 电网时换流母线的自阻抗和互阻抗近似为:

$$Z'_{eqii} = Z'_{eqjj} = Z'_{eqij} = \frac{z'_i z'_j}{z'_i + z'_j} \quad (12)$$

设所有阻抗角一致, 则由式(8)、(9)、(11)、(12)可得:

$$\begin{cases} |Z'_{eqii}| = |Z'_{eqjj}| = \left| \frac{z_i z_j}{z_i/k_2 + z_j/k_1} \right| > \left| \frac{z_i z_j}{z_i + z_j} \right| = \\ |Z_{eqii}| = |Z_{eqjj}| \end{cases} \quad (13)$$

由式(3)、(13)可知, 在两回特高压直流输送功率不变的情况下, 单层接入 500 kV 电网时的 $MISCR'_i$ 小于单层接入 1000 kV 电网时的 $MISCR_i$ 。

(2) 当 $|z_{ij}| \rightarrow \infty$ 时, 即两回直流间的电气距离无穷大, 可以视为单馈入交直流系统。两回特高压直流单层接入 1000 kV 电网时换流母线的自阻抗和互阻抗近似为:

$$\begin{cases} Z_{eqii} = z_i \\ Z_{eqjj} = z_j \\ Z_{eqij} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

两回特高压直流单层接入 500 kV 电网时换流母线的自阻抗和互阻抗近似为:

$$\begin{cases} Z'_{eqii} = z'_i \\ Z'_{eqjj} = z'_j \\ Z'_{eqij} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(8)、(9)、(14)、(15)可得:

$$\begin{cases} |Z'_{eqii}| = |z'_i| = k_1 |z_i| > |z_i| = |Z_{eqii}| \\ |Z'_{eqjj}| = |z'_j| = k_2 |z_j| > |z_j| = |Z_{eqjj}| \\ |Z'_{eqij}| = 0 = |Z_{eqij}| \end{cases} \quad (16)$$

由结果可知, 在两回特高压直流输送功率不变的情况下, $MISCR'_i < MISCR_i$ 。

(3) 当 $|z_{ij}| \neq 0$, 即两回特高压直流接入不同落点时, 设所有阻抗角一致, 则由式(8)——(12)可得:

$$\begin{aligned} |Z'_{eqij}| &= \left| \frac{k_1 k_2 z_i z_j}{k_1 z_i + k_2 z_j + k_3 z_{ij}} \right| = \\ &= \left| \frac{z_i z_j}{z_i/k_2 + z_j/k_1 + [k_3/(k_1 k_2)] z_{ij}} \right| > \\ &= \left| \frac{z_i z_j}{z_i + z_j + z_{ij}} \right| = |Z_{eqij}| \quad k_1 k_2 > k_3 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} |Z'_{eqii}| &= \left| \frac{k_1 z_i k_3 z_{ij}^2 + k_1 z_i k_2 z_j}{k_1 z_i + k_2 z_j + k_3 z_{ij}} \right| = \\ &= \left| \frac{[k_1 k_3 z_i^2 z_{ij} + k_1 k_2 z_i^2 z_j + k_1 (k_2 + k_3) z_i z_j z_{ij} + k_1 k_2 z_i z_j^2 + k_1 k_3 z_i z_{ij}^2] \div}{[(k_1 z_i + k_2 z_j + k_3 z_{ij}) (z_i + z_j + z_{ij})]} \right| > \\ &= \left| \frac{[k_1 z_i^2 z_{ij} + k_1 z_i^2 z_j + (k_2 + k_3) z_i z_j z_{ij} + k_2 z_i z_j^2 + k_3 z_i z_{ij}^2] \div}{[(k_1 z_i + k_2 z_j + k_3 z_{ij}) (z_i + z_j + z_{ij})]} \right| = \\ &= \left| \frac{(z_i z_{ij} + z_i z_j)}{(z_i + z_j + z_{ij})} \right| = |Z_{eqii}| \end{aligned} \quad (18)$$

同样的, 在满足 $k_1 k_2 > k_3$ 且两回特高压直流输送功率不变的情况下, $MISCR'_i < MISCR_i$ 。

综上所述, 在一般情况下, 当两回特高压直流单层馈入时, 相比接入 500 kV 交流电网, 接入 1000 kV 交流电网时系统具有更大的 MISCR 和更强的电压支撑能力。

1.2.2 两回特高压直流分层馈入模式下的 MISCR

两回特高压直流分层接入 1000 kV 和 500 kV 交流电网, 简化模型如图 4 所示。图 4 中, a_1 和 a_2 为特高压直流系统 a 的 2 个分支, b_1 和 b_2 为特高压直流系统 b 的 2 个分支。

假定 1000 kV 换流母线 i 和 m 后的系统等值阻

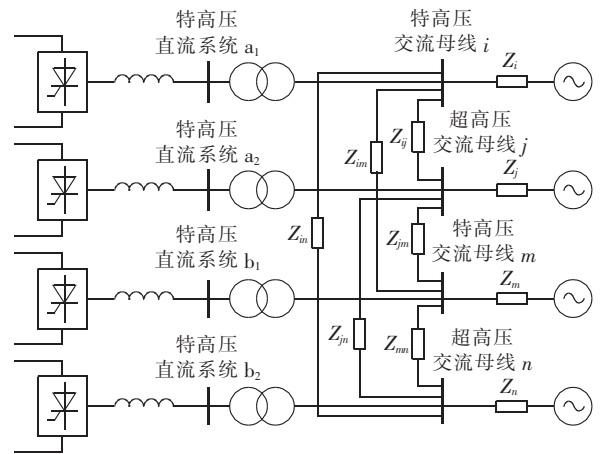


图 4 两回特高压直流分层馈入简化模型
Fig.4 Simplified model for hierarchical infeed of dual-loop UHVDC

抗值近似相等,500 kV 换流母线 j 和 n 后的系统等值阻抗值近似相等,即 $|z_j| \approx |z_n| = k|z_i| \approx k|z_m|$ ($k > 1$),且近似认为各换流母线间的联系阻抗值相同,即 $|z_{ij}| \approx |z_{im}| \approx |z_{in}| \approx |z_{jm}| \approx |z_{jn}| \approx |z_{mn}|$,则两回特高压直流分层馈入时换流母线节点所对应的导纳矩阵为:

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_i} + \frac{3}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} \\ -\frac{1}{z_{ij}} & \frac{1}{kz_i} + \frac{3}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} \\ -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & \frac{1}{z_i} + \frac{3}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} \\ -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & -\frac{1}{z_{ij}} & \frac{1}{kz_i} + \frac{3}{z_{ij}} \end{bmatrix} \quad (19)$$

利用 MATLAB 对 $\bar{Y}$ 求逆得到节点等值阻抗矩阵 $\bar{Z}_{eq}$ 。在换流母线间联系阻抗相对于系统等值阻抗较小的情况下,可以忽略 $\bar{Z}_{eq}$ 中各元素的余项,得到 $\bar{Z}_{eqi}$ 、 $\bar{Z}_{eqjj}$ 和 $\bar{Z}_{eqij}$ 均近似为 $kz_i/(2+2k)$ 。根据式(3),在两回特高压直流分层馈入模式下,第 i 回直流系统对应的 MISCR 近似为:

$$MISCR_i = \frac{1}{(P_{di} + P_{dj})|kz_i/(2+2k)|} \quad (20)$$

对比特高压直流分层接入交流电网与单层接入 1000 kV 交流电网这 2 种模式,在特高压直流落点不变的情况下,根据式(17)和(18)可得单层接入 1000 kV 交流电网时系统的 MISCR 近似为:

$$MISCR_i = \frac{1}{(P_{di} + P_{dj})|kz_i/(1+k)|} \quad (21)$$

由式(20)和(21)可知,当换流母线间联系阻抗相对于系统等值阻抗较小时,两回特高压直流分层接入交流电网比单层接入 1000 kV 交流电网具有更大的 MISCR,分层馈入模式下受端系统对直流系统具有更强的电压支撑能力。

2 多回特高压直流分层馈入模式下的交流电网稳态电压

2.1 单回特高压直流馈入时的交流电网稳态电压

在交直流混联系统中,当输电设备投切以及直流馈入功率或系统负荷发生改变时,会引起交流电网电压变化,如果受端系统较弱,交流电网的电压变化会更加明显。一般情况下,交流电网稳态电压偏离额定值越大,电网发生故障时的电压越界风险也越高。

单回直流馈入的稳态电压分析模型如图 5 所示。对于图 5 中的系统,有:

$$S_s = U_s I_s^* = P_s + jQ_s = U_s I_s \cos \varphi_s + jU_s I_s \sin \varphi_s \quad (22)$$

其中, S_s 为换流母线 s 注入交流系统的单相功率; P_s 和 Q_s 分别为相应的单相有功和无功功率; U_s 为换流

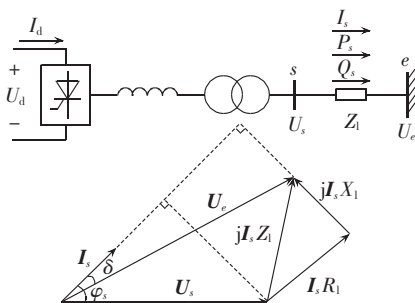


图 5 单馈入直流系统稳态电压分析模型

Fig.5 Steady-state voltage analysis model of single-infeed DC system

母线相电压; I_s 为换流母线注入交流系统的相电流; φ_s 为功率因数角。此时对应的交流系统电压变化为:

$$U_{drop} = I_s Z_1 \quad (23)$$

电压变化 U_{drop} 可分解为沿 I_s 方向的 $I_s R_1$ 以及垂直于 I_s 方向的 $j I_s X_1$ 2 个分量(R_1 和 X_1 分别为 Z_1 的实部与虚部),则交流系统稳态电压 U_e 可表示为:

$$U_e = U_s + j I_s Z_1 = U_e \angle \delta \quad (24)$$

$$U_e = \sqrt{(U_e \cos \delta)^2 + (U_e \sin \delta)^2} =$$

$$\sqrt{(U_s \cos \varphi_s + I_s R_1)^2 + (U_s \sin \varphi_s - I_s X_1)^2} = \sqrt{(P_s U_s / S_s + I_s R_1)^2 + (Q_s U_s / S_s - I_s X_1)^2} \quad (25)$$

其中, δ 为 I_s 超前 U_e 的相角。由式(22)和式(25)得:

$$U_e = \sqrt{\left(\frac{P_s}{S_s} U_s + \frac{S_s}{U_s} R_1\right)^2 + \left(\frac{Q_s}{S_s} U_s - \frac{S_s}{U_s} X_1\right)^2} \quad (26)$$

直流系统换流站运行需要大量无功功率,正常情况下约为直流传输功率的 40%~60%^[16-17]。此处假定 Q_s 的大小为 $0.5P_s$,设 U_s 为基准电压且大小为 1,代入式(26)后化简可得:

$$U_e \approx \sqrt{1.25 P_s^2 |Z_1|^2 - P_s |Z_1| + 1} \quad (27)$$

结合式(1)中的短路比定义可知,当换流母线电压固定为 1 时,有:

$$K_{SCR} = \frac{1}{P_s |Z_1|} \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)得:

$$U_e \approx \sqrt{1.25 (1/K_{SCR})^2 - (1/K_{SCR}) + 1} = \sqrt{1.25 (1/K_{SCR} - 1/2.5)^2 + 0.8} \quad (29)$$

由式(29)可知,在单回直流馈入模式下,若假定换流母线相电压 U_s 为额定值不变,有:(1)当 $K_{SCR} > 2.5$ 时, K_{SCR} 越大, U_e 越大;当 $K_{SCR} < 2.5$ 时, K_{SCR} 越大, U_e 越小。事实上,当馈入的直流功率 P_s 增加时,无功消耗的增长会使得交流电压及直流电压出现不同程度的下降,即 U_s 会降低^[18]。上述分析从侧面表明,在单回直流馈入模式下,随着直流注入功率的增大,当 $K_{SCR} > 2.5$,即受端系统为强系统时, U_e 的下降程度小于 U_s ;当 $K_{SCR} < 2.5$,即受端系统为弱系统时, U_e 的下降程度大于 U_s 。

2.2 两回直流分层馈入时交流系统的稳态电压

当两回特高压直流分层接入交流电网时,其稳态电压分析模型如图 6 所示,为说明方便,图 6 中在考虑其他直流系统影响的条件下对单回特高压直流系统进行分析。

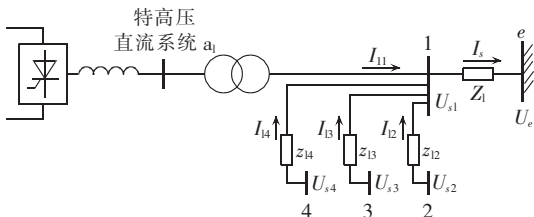


图 6 特高压直流分层馈入时的稳态电压分析模型

Fig.6 Steady-state voltage analysis model of UHVDC system in hierarchical infeed mode

图 6 中,节点 1—4 表示两回特高压直流分层馈入时在不同接入点的换流母线,其中节点 1 和 3 为 1000 kV 换流母线,节点 2 和 4 为 500 kV 换流母线。根据基尔霍夫电流定律,在换流母线 1 处注入交流电网的电流 I_s 满足:

$$I_s = \sum_{k=1}^4 I_{1k} \quad (30)$$

其中,对于电流 $I_{1k}(k=2,3,4)$ 有:

$$I_{1k} = \frac{U_{sk} - U_{s1}}{z_{1k}} \quad (31)$$

从换流母线 1 处看进去的交流系统稳态电压 U_e 为:

$$U_e = U_{s1} - I_s Z_l \quad (32)$$

将式(30)与式(31)代入式(32),得:

$$U_e = (U_{s1} - I_{11} Z_l) - \sum_{k=2}^4 \frac{U_{sk} - U_{s1}}{z_{1k}} Z_l = U_e' - \sum_{k=2}^4 \frac{U_{sk} - U_{s1}}{z_{1k}} Z_l \quad (33)$$

其中, U_e' 为不考虑其他直流系统影响时,单回特高压直流馈入情况下的交流系统稳态电压,其大小可以由式(27)计算。

当两回特高压直流单层馈入 1000 kV 交流系统时,对应的交流系统稳态电压为:

$$U_e = U_e'' - \frac{U_{s3} - U_{s1}}{z_{13}} Z_l \quad (34)$$

其中, U_e'' 与 U_e' 含义相同,二者的区别在于 U_e' 计算公式中的有功功率 P_s 为 U_e'' 中的 $1/2$ 。

对比两回特高压直流分层接入交流电网与单层接入交流电网这 2 种模式。设 ΔU 为 2 种模式下的交流系统稳态电压差,令式(33)和(34)相减可得:

$$\Delta U \approx (U_e' - U_e'') + \left[- \left(\frac{U_{s2} - U_{s1}}{z_{12}} + \frac{U_{s4} - U_{s1}}{z_{14}} \right) Z_l \right] = \Delta U_{hie} + \Delta U_{mul} \quad (35)$$

其中, ΔU_{hie} 为直流分层馈入引起的电压变化量; ΔU_{mul} 为多回直流相互作用引起的电压变化量。

令 P_s 为分层馈入模式下换流母线注入交流系统的单相有功功率,以 P_s 为变量将 $|U_e'|$ 和 $|U_e''|$ 进行二阶泰勒展开得:

$$\begin{cases} |U_e'| = 1 - 0.5 |Z_l| P_s + (1.25 |Z_l|^2 + 0.25 |Z_l|) P_s^2 + R_n(P_s) \\ |U_e''| = 1 - |Z_l| P_s + (5 |Z_l|^2 + |Z_l|) P_s^2 + R_n(P_s) \end{cases} \quad (36)$$

其中, $R_n(P_s)$ 为泰勒公式的余项。

在忽略 U_e' 和 U_e'' 相位差的基础上,由式(35)和式(36)可得:

$$\begin{cases} |\Delta U_{hie}| = |U_e'| - |U_e''| \approx 0.5 |Z_l| P_s - (3.75 |Z_l|^2 + 0.75 |Z_l|) P_s^2 \\ \Delta U_{mul} = - \left(\frac{U_{s2} - U_{s1}}{z_{12}} + \frac{U_{s4} - U_{s1}}{z_{14}} \right) Z_l \end{cases} \quad (37)$$

由式(37)可知, $|\Delta U_{hie}|$ 主要受直流注入功率以及馈入点的系统等值阻抗的影响; ΔU_{mul} 除了受馈入点系统等值阻抗的影响外,还与流过换流母线间等值联系阻抗的电流相关。最终决定多回特高压直流分层接入交流电网和单层接入交流电网这 2 种模式对交流系统稳态电压的影响,需要结合具体系统进行分析。

3 多回特高压直流分层馈入时的直流系统极限传输功率

3.1 直流极限传输功率概念

当多回特高压直流馈入交流系统时,假设所研究的第 i 回直流系统为定熄弧角控制,其他直流系统电流不发生变化,且保持稳定运行。第 i 回直流系统输送的有功功率 P_i 一般会随着换流母线注入交流系统电流 I_i 的增加而增大,在此过程中所增加的无功消耗使得交流电压及直流电压出现下降。当 I_i 增大到某一数值时,继续增大 I_i 带来的功率增长不足以抵消电压下降造成的功率下降,从而使得 P_i 开始降低,因此存在最大直流功率 $P_{max}^{[19]}$ 。当第 i 回直流系统输送的有功功率 P_i 满足下列条件时, P_i 达到最大:

$$\frac{dP_i}{dI_i} = 0 \quad (38)$$

随着 P_i 的增加,如果被馈入的交流系统支撑强度不够,则有可能在馈入的直流功率达到最大之前,交流系统已经出现潮流不收敛,从而无法继续增加直流功率至最大值。本文中将刚开始出现潮流不收敛时的直流输送功率与最大直流功率这二者的较小值定义为直流极限传输功率 P_{lim} ,满足 $P_{lim} \leq P_{max}$ 。在多回特高压直流分层馈入模式下,由于计算第 i 回直流系统的 P_{lim} 需要求解的稳态方程数目庞大且难以得到 P_{lim} 的解析解,为此本文采用自组织临界方法,通过逐步增加直流输送功率的方式求取 P_{lim} 。

3.2 直流极限传输功率计算方法

自组织临界理论是复杂科学的重要组成部分,解释了自然界中远离平衡态且彼此影响的耗散动力系统通过自组织过程向临界状态发展的过程。这类系统中能量注入是持续且缓慢的,称为慢过程;能量耗散相对而言极为迅速,称为快过程。自组织临界慢过程可以模拟电网状态缓慢发展的过程,包括发电机出力和负荷量的缓慢增加以及各支路传输容量的逐渐变化等^[20-21]。为求出直流系统的极限传输功率,同时得出直流系统电流与输送功率的对应关系,本文应用自组织临界慢过程分析方法,通过缓慢增加直流系统馈入电流的方式,对直流输送功率随电流增加而变化的整体趋势进行仿真。直流系统电流的增长模型如下:

$$I_k=I_0\prod_{i=1}^k\lambda_i$$
 (39)

其中, I_0 为较小的直流系统电流初值; λ_i 为直流系统电流增长系数。每增加一定比例的直流系统电流,即进行潮流仿真并计算直流馈入功率,直至直流馈入功率达到最大值或潮流不收敛。

4 算例分析

本文以中国某区域规划电网为例进行分析计算。该电网为包含特高压的交直流混联电网,有 10 个 1000 kV 节点和 10 条 1000 kV 交流支路,并有 2 回特高压直流馈入。将该电网进行等值简化后其

中包含 220 kV 及以上电压等级的节点 1 604 个、支路 2 812 条,总负荷 2.05×10^5 MW。在 MATLAB 环境下,利用 PSAT(Power System Analysis Toolbox)软件平台进行数学建模,对多回特高压直流分层馈入模式下交直流混联系统的稳态特性进行仿真分析。

4.1 特高压直流不同馈入模式下的 MISC R

根据上述 MISC R 计算方法,分别计算两回特高压直流在单层接入 500 kV 交流电网、单层接入 1 000 kV 交流电网以及分层接入 500 kV 和 1 000 kV 交流电网这 3 种模式下的 MISC R,结果如表 1 和表 2 所示,表中各参数均以标么值表示。

由表 1 可知在单层接入模式下,等值阻抗比例系数为 $k_1=0.65/0.48=1.35$, $k_2=0.62/0.49=1.27$, $k_3=0.073/0.051=1.43$,显然 $k_1k_2=1.71>1.43=k_3$,此时两回特高压直流单层接入 1 000 kV 电网的 MISC R 分别为 3.071 和 3.172,大于单层接入 500 kV 电网时的 MISC R,这与理论分析相符。结合表 1 和表 2 还可以看出,按照 MISC R 由大到小的顺序,相应的两回特高压直流馈入模式依次为:分层接入 500 kV 和 1 000 kV 交流电网,单层接入 1 000 kV 交流电网,以及单层接入 500 kV 交流电网。其中,在分层馈入模式下 MISC R 最大。根据 IEEE 提出的利用 MISC R 划分交直流系统强弱的标准,当 MISC R 大于 2.5 时多馈入交直流系统为强系统^[6]。由表 1 和表 2 中的 MISC R 可知,当两回特高压直流单层接入 1 000 kV 电网以及分层接入 500 kV 和 1 000 kV 电网时,交流

表 1 两回特高压直流单层接入交流电网时的多馈入短路比
Table 1 MISC R analysis for dual-loop UHVDC in simple infeed mode

参数	单层接入 500 kV 交流电网		单层接入 1 000 kV 交流电网	
	直流回路 1	直流回路 2	直流回路 1	直流回路 2
有功功率	$P_{s1}=0.64$	$P_{s2}=0.72$	$P_{s1}=0.64$	$P_{s2}=0.72$
无功功率	$Q_{s1}=0.32$	$Q_{s2}=0.36$	$Q_{s1}=0.32$	$Q_{s2}=0.36$
交流系统等值阻抗	$Z_1=0.65$	$Z_2=0.62$	$Z_1=0.48$	$Z_2=0.49$
换流母线联系阻抗	$Z_{12}=0.073$	$Z_{21}=0.073$	$Z_{12}=0.051$	$Z_{21}=0.051$
节点阻抗矩阵第 1 行	$Z_{eq11}=0.34$	$Z_{eq12}=0.30$	$Z_{eq11}=0.25$	$Z_{eq12}=0.23$
节点阻抗矩阵第 2 行	$Z_{eq21}=0.30$	$Z_{eq22}=0.34$	$Z_{eq21}=0.23$	$Z_{eq22}=0.25$
MISC R	$MISC R_1=2.300$	$MISC R_2=2.289$	$MISC R_1=3.071$	$MISC R_2=3.172$

表 2 两回特高压直流分层接入交流电网时的多馈入短路比
Table 2 MISC R analysis for dual-loop UHVDC in hierarchical infeed mode

参数	直流回路 1	直流回路 2	直流回路 3	直流回路 4
有功功率	$P_{s1}=0.32$	$P_{s2}=0.32$	$P_{s3}=0.36$	$P_{s4}=0.36$
无功功率	$Q_{s1}=0.16$	$Q_{s2}=0.16$	$Q_{s3}=0.18$	$Q_{s4}=0.18$
交流系统等值阻抗	$Z_1=0.48$	$Z_2=0.65$	$Z_3=0.49$	$Z_4=0.62$
换流母线联系阻抗	$Z_{12}=0.091$	$Z_{21}=0.091$	$Z_{31}=0.051$	$Z_{41}=0.107$
换流母线联系阻抗	$Z_{13}=0.051$	$Z_{23}=0.098$	$Z_{32}=0.098$	$Z_{42}=0.073$
换流母线联系阻抗	$Z_{14}=0.107$	$Z_{24}=0.073$	$Z_{34}=0.095$	$Z_{43}=0.095$
节点阻抗矩阵第 1 行	$Z_{eq11}=0.150$	$Z_{eq12}=0.132$	$Z_{eq13}=0.134$	$Z_{eq14}=0.131$
节点阻抗矩阵第 2 行	$Z_{eq21}=0.132$	$Z_{eq22}=0.155$	$Z_{eq23}=0.132$	$Z_{eq24}=0.135$
节点阻抗矩阵第 3 行	$Z_{eq31}=0.134$	$Z_{eq32}=0.132$	$Z_{eq33}=0.150$	$Z_{eq34}=0.132$
节点阻抗矩阵第 4 行	$Z_{eq41}=0.131$	$Z_{eq42}=0.135$	$Z_{eq43}=0.132$	$Z_{eq44}=0.156$
MISC R	$MISC R_1=5.38$	$MISC R_2=5.32$	$MISC R_3=5.36$	$MISC R_4=5.30$

系统对馈入的直流系统具有较强的电压支撑作用。

4.2 特高压直流不同馈入模式下的极限传输功率

从接近于 0 的初值开始逐步增加某特高压直流回路注入交流系统的电流,电流增长系数 $\lambda = 1.01$,其余直流回路的注入功率保定额定值不变。在不同馈入模式下,特高压直流传输功率随电流变化的曲线如图 7 所示,其中直流电流和直流馈入功率均为标么值。

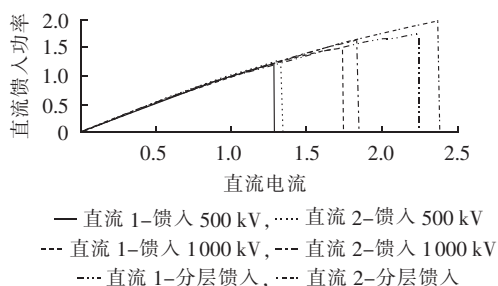


图 7 特高压直流不同馈入模式下的功率曲线

Fig.7 Power curve of UHVDC for different infeed modes

在 3 种不同的馈入模式下,交流系统均于两回特高压直流未达到最大传输功率前出现潮流不收敛。由图 7 可知,特高压直流接入 500 kV 交流电网时,两回直流的极限传输功率分别为其额定功率的 1.23 倍与 1.25 倍;接入 1000 kV 交流电网时,两回直流的极限传输功率分别为其额定功率的 1.51 倍与 1.65 倍;分层接入 500 kV 和 1000 kV 交流电网时,两回直流的极限传输功率分别为其额定功率的 1.74 倍与 1.98 倍。上述结果表明在本算例中采用分层馈入模式有助于增大直流系统的极限传输功率,提高交流系统对特高压直流的电压支撑能力,增加交直流混联系统的稳定裕量。

5 结论

本文重点分析了两回特高压直流在 3 种馈入模式下的 MISCRA、交流系统稳态电压以及直流极限传输功率,结论如下。

(1)在一定条件下,当两回特高压直流馈入受端系统时,分层接入 1000 kV 和 500 kV 交流电网、单层接入 1000 kV 交流电网、单层接入 500 kV 交流电网这 3 种模式所对应的 MISCRA 的数值依次降低。分层馈入模式有助于促进不同电压等级电网之间的协调配合,提高交流系统对特高压直流的电压支撑能力,提升交直流混联系统的安全性。

(2)在特高压直流单层馈入模式下,当受端系统较强时,随着直流注入功率的增大,交流系统稳态电压的降幅小于直流接入端电压;当受端系统较弱时,随着直流注入功率的增大,交流系统稳态电压的降幅大于直流接入端电压。

(3)对两回特高压直流馈入系统,在不同馈入模式下直流系统的极限传输功率随 MISCRA 的增加而增大,二者呈正相关关系;采用分层馈入模式有助于增大直流系统的极限传输功率,提高交直流混联系统的稳定裕量。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京:中国电力出版社,2013:11-14,108-111.
- [2] 邓旭,王东举,沈扬,等. ± 1100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):133-140. DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ± 1100 kV UHVDC power transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4):133-140.
- [3] KRISHAYYA P C S, ADAPA R, HOLM M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. Paris, France: CIGRE, 1997.
- [4] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147. YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):140-147.
- [5] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed [R]. Paris, France: CIGRE, 2008.
- [6] 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.
- [7] 黄弘扬,徐政,许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有效性分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):46-50. HUANG Hongyang, XU Zheng, XU Feng. Effectiveness of short circuit ratio index for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11):46-50.
- [8] 林伟芳,汤涌,郭小江. 多馈入交直流系统短路比影响因素分析[J]. 电网技术,2011,35(8):64-68. LIN Weifang, TANG Yong, GUO Xiaojiang. Analysis of influencing factors of short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2011, 35(8):64-68.
- [9] 郭小江,汤涌,郭强,等. CIGRE 多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(9):69-74,81. GUO Xiaojiang, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISCRA index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9):69-74, 81.
- [10] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):1-7. LIU Zhenya, QIN Xiaohui, ZHAO Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):1-7.
- [11] 高媛,韩民晓. 特高压直流输电多端馈入方式稳态特性研究[J]. 电网技术,2014,38(12):3447-3452. GAO Yuan, HAN Minxiao. Steady state characteristic of multi

- infeed UHVDC power transmission[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3447-3452.
- [12] DE TOLEDO P F, BERGDAHL B, ASPLUND G. Multiple infeed short circuit ratio-aspects related to multiple HVDC into one AC network[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific. Dalian, China: IEEE, 2005: 1-6.
- [13] 徐箭, 张华坤, 孙涛, 等. 多馈入直流系统的特高压直流接入方式优选方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(6): 58-63.
XU Jian, ZHANG Huakun, SUN Tao, et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(6): 58-63.
- [14] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 7-12.
LIN Weifang, TANG Yong, BU Guangquan. Study on voltage stability of multi-infeed HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 7-12.
- [15] 李传栋, 杨桂钟, 陈晶腾, 等. 特高压直流分层接入方式的落点选择研究[J]. 福建工程学院学报, 2014, 12(6): 567-572.
LI Chuandong, YANG Guizhong, CHEN Jingteng, et al. Study on DC links termination selection of UHVDC hierarchical connection mode [J]. Journal of Fujian University of Technology, 2014, 12(6): 567-572.
- [16] 刘晓明, 慈文斌, 刘玉田. 直流控制方式对受端电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(4): 69-73.
LIU Xiaoming, CI Wenbin, LIU Yutian. Influence of DC system control mode on voltage stability of receiving-end power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 69-73.
- [17] 徐梅梅, 李兴源, 白加林, 等. 交直流并联系统的换流母线电压稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7): 6-10.
XU Meimei, LI Xingyuan, BAI Jialin, et al. Analysis on voltage stability at commutation buses of parallel AC/DC power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(7): 6-10.
- [18] 张建设, 张尧, 张志朝, 等. 交直流并联系统的电压稳定研究综述[J]. 继电器, 2005, 33(2): 79-84.
ZHANG Jianshe, ZHANG Yao, ZHANG Zhichao, et al. Voltage stability study of parallel AC/DC power systems [J]. Relay, 2005, 33(2): 79-84.
- [19] AIK D L H, ANDERSSON G. Power stability analysis of multi-infeed HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [20] 侯俊, 周孝信, 肖逾男. 电力系统自组织临界特性分析与仿真模型[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 7-12.
YI Jun, ZHOU Xiaoxin, XIAO Yunan. Analysis on power system self-organized criticality and its simulation model [J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 7-12.
- [21] 曹一家, 曹丽华, 李勇, 等. 考虑大停电风险的多阶段电网扩展规划方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 1-7.
CAO Yijia, CAO Lihua, LI Yong, et al. Multi-stage transmission expansion planning with consideration of large-area outage risk [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 1-7.

作者简介:



赵 腾

赵 腾(1990—),男,河北石家庄人,博士研究生,研究方向为电力系统规划与电力系统可靠性(E-mail: zhaoteng@sjtu.edu.cn);

张 焰(1958—),女,安徽合肥人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统规划与电力系统可靠性(E-mail: zhang_yan@sjtu.edu.cn);

叶冠豪(1990—),男,安徽六安人,硕士,研究方向为电力系统安全性(E-mail: 928337760@qq.com);

张 璨(1988—),男,安徽巢湖人,硕士,研究方向为电力系统需求侧管理(E-mail: 616877090@qq.com);

卫 茹(1988—),女,安徽马鞍山人,硕士,研究方向为电力系统可靠性(E-mail: 154560261@qq.com);

朱晨曦(1992—),男,湖北赤壁人,硕士研究生,研究方向为电力系统可靠性(E-mail: benny_zcx@sjtu.edu.cn)。

Steady-state characteristics analysis for AC-DC hybrid system in hierarchical-infeed mode of multi-loop UHVDC

ZHAO Teng¹, ZHANG Yan¹, YE Guanhao², ZHANG Can², WEI Ru², ZHU Chenxi¹

(1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210000, China)

Abstract: For three infeed modes of multi-loop UHVDC: simply into UHVAC, simply into EHVAC and hierarchically into UHVAC and EHVAC, the steady-state characteristics of AC-DC hybrid system are analyzed in three aspects: MISCRA (Multi-Infeed Short Circuit Ratio), AC system steady-state voltage and UHVDC transmission power limit. A method of UHVDC transmission power limit analysis based on the self-organized critical slow process is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified by simulating the feeding of a dual-loop UHVDC into AC grid and the results show that, the hierarchical infeed mode has better MISCRA to enhance the voltage support capability of AC grid for UHVDC.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; hierarchical infeed; AC-DC hybrid system; multi-infeed short circuit ratio; steady-state voltage; power transmission limit; self-organized criticality