

DOI: 10.7667/PSPC160578

计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标

刘青¹, 廖诗武¹, 姚伟¹, 刘明松², 文劲宇¹, 张健²

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 多馈入有效短路比能够同时反映交流系统强弱和直流系统间相互作用, 是进行多馈入交直流系统分析和评估的重要指标, 但是在实际工程应用中仍出现了指标计算结果与系统实际电压稳定不相符的情况。在推导并联电容器补偿对短路电流影响的数学关系的基础上, 分析得出现有的多馈入有效短路比指标由于未考虑并联电容器补偿时存在不足而具有局限性。针对这个问题, 提出一种能够计及并联电容器补偿的改进多馈入有效短路比指标, 该指标通过将系统并联电容器容量折算到直流落点处来进一步计及其给系统电压稳定带来的影响, 并给出所提改进短路比指标的计算公式。以修改的新英格兰 39 节点系统为例, 研究了并联电容器补偿对系统电压稳定性的影响, 分析了现有多馈入短路比和所提改进指标与并联电容器补偿的容量和补偿位置的关系, 研究表明, 所提改进有效短路比指标比现有多馈入有效短路指标更能够准确地反映交流系统的强弱程度。最后通过浙江电网仿真验证了所提改进有效短路比在描述多馈入交直流系统强度的准确性和适用性。

关键词: 多馈入交直流系统; 多馈入有效短路比; 短路电流; 多馈入交互因子; 并联电容器补偿; 改进多馈入有效短路比

An improved effective short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system considering shunt capacitors

LIU Qing¹, LIAO Shiwu¹, YAO Wei¹, LIU Mingsong², WEN Jinyu¹, ZHANG Jian²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Multi-infeed effective short-circuit ratio (MESCR), which can reflect strength of the AC system as well as the influence of DC systems interaction, is an important index for analysis and evaluation of multi-infeed AC/DC power system. This paper theoretically proves the limitation of the existing MESCR on evaluating the influence of massive shunt capacitor compensation, and then proposes an improved multi-infeed effective short circuit ratio (IMESCR) to take the impact of the shunt capacitors into account by converting the capacity of shunt capacitors to inverter station of HVDC. Case study is carried out based on New England 39-bus system to analyze the influence of capacity and location of the shunt capacitors on MESCR and IMESCR, respectively. The simulation results indicate that the proposed IMESCR is able to describe the strength of AC/DC power system more accurately than MESCR. Finally, the feasibility and accuracy of the proposed IMESCR are validated through simulation study of Zhejiang power grid.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900805).

Key words: multi-infeed AC/DC power system; multi-infeed effective short-circuit ratio (MESCR); short-circuit current; multi-infeed interaction factor (MIIF); shunt capacitor compensation; improved multi-infeed effective short circuit ratio

0 引言

随着多回特高压直流工程投入运行, 作为负荷中心的华东地区, 已经不可避免地形成了多回直流

馈入同一受端系统的格局, 而且在规划中还将会会有更多的直流线路落点于这些区域。直流落点密集、输送容量大等给交直流系统安全稳定运行带来了新的挑战^[1-3]。

在直流线路的规划和运行中, 通常引入短路比指标来衡量交直流系统中交流系统相对于直流系统

的支撑能力^[4]。文献[5]分析了短路比指标在判断单馈入系统的电压稳定、动态过电压等方面的有效性。由于在多馈入系统中,某一直流系统换流母线的电压除了受到所在交流系统的影响外,还受到互联系统中其他直流系统的影响^[6],系统的无功功率调节问题和电压稳定问题较纯交流系统和单馈入系统更加突出和复杂^[7-9],采用传统单馈入直流短路比指标计算时,由于忽略了直流系统间的相互影响,使得计算结果偏乐观,不能满足分析要求^[10]。因此,各国学者对适用于多馈入直流系统的短路比指标进行了大量的研究^[10-16]。文献[10]以互阻抗反映多馈入交直流系统中各直流的相互影响,提出了多馈入短路比与有效短路比的定义。文献[11]利用解耦模型推导出多馈入临界短路比的表达式,并证明了多馈入临界短路比与电压灵敏因子的等价关系,奠定了利用多馈入短路比分析电压稳定的基础。文献[12]在多馈入直流量化指标以及无功有效短路比的基础上,计入了直流系统之间的相互影响,延伸定义了多馈入无功有效短路比,并给出了多馈入交直流系统强弱的划分标准。但是由于多直流馈入系统的复杂性,对多馈入短路比指标的改进仍在不断推进中。

文献[15]所提出的多馈入短路比指标是当前使用最为广泛的指标,其反映了多馈入交直流系统的直流间相互作用及电网对换流母线的无功电压支撑能力的大小,对交直流系统的电压稳定性具有一定程度的表征作用,利用该多馈入短路指标能够直观地初步评估系统保持电压稳定的能力^[17]。但是在对浙江电网 2016 年不同运行方式进行校验时出现了多馈入短路比指标远高于推荐值却会发生电压失稳的现象。通过分析发现,电力系统中的无功补偿装置对电压稳定性有极大的影响,同时也会影响到对交流电压较为敏感的直流输电换流站的稳定,然而现有多馈入有效短路比对系统并联补偿的变化不敏感,会出现无法准确反映并联补偿对系统电压稳定性的影响的情况。

为了解决当前多馈入短路比因无法准确计及系统中的并联电容补偿带来的评估失准问题,本文提出了一种计及系统并联电容器补偿影响的改进有效短路比指标,并给出了其理论计算公式。以修改的新英格兰 39 节点测试系统为例,仿真研究了并联电容器的补偿容量和补偿位置对现有多馈入短路比和所提改进短路比指标的影响。最后,通过浙江电网仿真验证了所提多馈入改进有效短路比用于评估多馈入直流系统电压稳定的有效性。

1 多馈入交直流系统短路比指标

对单馈入交直流系统,可采用短路比(Short Circuit Ratio, SCR)或有效短路比(Effective Short Circuit ratio, ESCR)来衡量系统电压支撑能力。

短路比 SCR 定义为换流站交流母线短路容量 S_c 与直流额定功率 P_{dN} 的比值^[4]:

$$I_{SCR} = \frac{S_c}{P_{dN}} \quad (1)$$

由于换流站工作时需消耗大量无功功率,因此往往需要在换流站装设大容量的并联电容补偿。电容器补偿的接入将增大直流馈入系统的短路阻抗,从而减小其短路容量,因此有必要计及换流站处并联电容补偿的影响^[18],为了计及其影响,定义有效短路比为^[5]

$$I_{ESCR} = \frac{S_c - Q_{cN}}{P_{dN}} \quad (2)$$

式中, Q_{cN} 为当换流站交流母线电压取额定值时交流滤波器和无功补偿电容器所产生的无功功率。

面对多直流馈入系统时,由于传统单馈入短路比没有考虑多回直流间的相互影响,因此得到的评估结果往往偏于乐观^[17]。为了准确评估多直流馈入系统的稳定性,CIGRE 直流工作组在 2007 年提出了多馈入有效短路比指标(Multi-infeed effective short circuit ratio, MESCR)^[19]。

在计算 MESCR 时,涉及到换流母线之间的相互作用,因此 CIGRE WG B4 工作组提出多馈入相互作用因子(Multi infeed interaction factor, MIIF)来衡量直流间电压相互影响程度^[20],多馈入相互作用因子是决定多馈入短路比定义的关键,它能够反映各直流逆变站间的电气耦合关系。其表达式为

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \quad (3)$$

于是在单馈入系统 ESCR 基础上,计入多直流间相互作用后,多馈入有效短路比指标的计算公式为^[15]

$$I_{MESCRi} = \frac{S_{aci} - Q_{cNi}}{P_{dNi} + \sum_{j=1, j \neq i}^k MIIF_{ji} \cdot P_{dNj}} \quad (4)$$

式中: S_{aci} 为换流站 i 处的短路容量; Q_{cNi} 是换流站 i 交流母线电压取额定值时换流站内滤波器和并联电容器提供的无功功率; P_{dNi} 、 P_{dNj} 分别为直流系统 i 和 j 的额定输送容量; k 为多馈入系统中所馈入的直流线路总数。

2 现有多馈入短路比指标的局限性

目前电力系统中绝大部分无功补偿采用并联电容器^[21], 而并联电容器供给的无功功率 Q_c 与所在节点的电压 V 的平方成正比, 即 $Q_c = V^2/X_c$ 。当补偿点电压下降时, 电容器提供给系统的无功功率将减少, 从而将导致电压进一步降低, 甚至出现电压崩溃。因此, 无功调节性能较差的并联电容器对系统暂态电压稳定有着不利的作用^[22]。考虑到并联电容补偿可能带来的不利影响, 文献[18]建议在计算短路比时计入并联电容的影响。由式(4), 对于一个确定的直流系统而言, 多馈入有效短路比对并联电容补偿变化的反映是通过短路容量 S_{aci} 及多馈入交互因子 $MIIF_{ji}$ 的变化来体现的。以下, 分别探究了短路容量和多馈入交互因子与并联电容器的关系。

2.1 短路容量与并联电容器补偿的关系

目前常用的短路计算方法分为基于网络和基于潮流两种, 但是这两种短路电流计算方法在计及并联电容补偿所带来的影响时都存在局限性。基于网络的短路电流计算方法可以通过电势源对短路点的转移阻抗来计算短路电流^[23], 以图 1 所示简化系统为例, 节点 j 处的短路电流可表示为

$$\dot{I}_j = \frac{\dot{E}_i}{\tilde{z}_{ji}} \quad (5)$$

式中, \tilde{z}_{ji} 为电势源 i 对短路点 j 的转移阻抗。

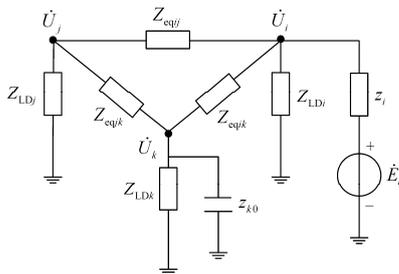


图 1 交流系统简化模型

Fig. 1 Simplified AC system model

利用节点阻抗矩阵可以方便地计算转移阻抗, 其表达式为

$$\tilde{z}_{ji} = \frac{Z_{ji}}{Z_{jj}} z_i \quad (6)$$

式中: Z_{jj} 为节点 j 的自阻抗; Z_{ji} 为节点 j 、 i 间的互阻抗; z_i 为电源内阻抗。

当节点 k 接入阻抗为 z_c 的并联电容补偿, 即在节点 k 追加一条对地连支时, 节点 j 自阻抗及 j 与 i 之间互阻抗变为

$$Z'_{jj} = Z_{jj} - \frac{Z_{jk}^2}{Z_{kk} + z_c} \quad (7)$$

$$Z'_{ji} = Z_{ji} - \frac{Z_{jk}Z_{ki}}{Z_{kk} + z_c} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入到转移阻抗计算公式(6)中, 可得接入并联电容补偿后的转移阻抗 \tilde{z}'_{ji} 为

$$\tilde{z}'_{ji} = \frac{Z_{kk}Z_{ji} + Z_{ji}z_c - Z_{jk}Z_{ki}}{Z_{jj}Z_{kk} + Z_{jj}z_c - Z_{jk}^2} z_i \quad (9)$$

从而可以得到并联电容接入后, 节点 j 处的短路电流变化量为

$$\Delta I_{fj} = |\dot{I}'_{fj}| - |\dot{I}_{fj}| \geq -|\dot{I}'_{fj} - \dot{I}_{fj}| \quad (10)$$

将式(5)、式(6)、式(9)代入式(10)可得

$$I'_f - I_f = \frac{Z_{jk}(Z_{ji}Z_{jk} - Z_{ki}Z_{jj})}{Z_{jj}[Z_{jj}(Z_{kk} + z_c) - Z_{jk}^2]} \quad (11)$$

对于标么值系统, $V_k \approx 1$ 有

$$z_c = -j \frac{1}{\omega C} = -j \frac{V_k^2}{Q_c} = -j \frac{1}{Q_c} \quad (12)$$

从而有短路电流受并联电容补偿影响为

$$\Delta I_{fj} \geq - \left| \frac{Z_{jk}(Z_{ji}Z_{jk} - Z_{ki}Z_{jj})}{Z_{jj}[Z_{jj}(Z_{kk} - Z_{jk}^2 - j/Q_c)]} \right| \quad (13)$$

选取标准 IEEE 10 机 39 节点系统中 bus-33、bus-20 分别作为短路电流测量点 j 和补偿点 k , 在基准功率为 100 MVA 下代入 Z_{jk} 、 Z_{ji} 、 Z_{ki} 、 Z_{jj} 、 Z_{kk} 标么值, 可得 Bus-33 节点短路电流变化量 ΔI_{fj} 随 bus-20 处接入的并联电容器补偿 Q_c 的变化趋势如图 2 所示。

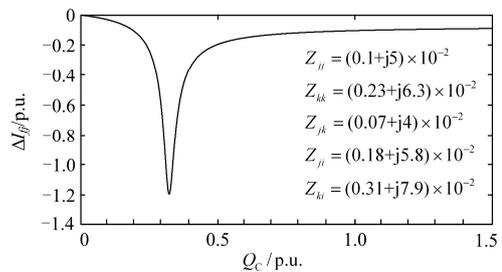


图 2 短路电流变化量与电容器补偿容量关系

Fig. 2 Relationship between short-circuit current deviation and shunt compensation capacity

由图 2 可以看出, 虽然 Q_c 较小时, ΔI_f 可能随着 Q_c 的增大而减小, 即是短路容量会随着 Q_c 的增大而减小, 但是当 Q_c 大于由系统特性决定的特定值后, 将出现 ΔI_f 不再随 Q_c 增大而减小的现象, 而是

随着即是 Q_C 增大而增大, 即是短路容量会随着 Q_C 增大而增大。由此可以得到结论: 在节点补偿容量大于一定量后, 短路容量将无法正确反映并联电容补偿对电压稳定带来的不利影响。

2.2 多馈入交互因子与并联电容器补偿的关系

交直流系统中存在大量的并联电容器补偿, 假设一并联电容器补偿投入位置为节点 k , 补偿容量为 Q_C , 并联电容器阻抗为 z_C , 则直流落点 i, j 的自阻抗及互阻抗变为

$$Z'_{ii} = Z_{ii} - \frac{Z_{ki}^2}{Z_{kk} + z_C} \quad (14)$$

$$Z'_{jj} = Z_{jj} - \frac{Z_{kj}^2}{Z_{kk} + z_C} \quad (15)$$

$$Z'_{ji} = Z_{ji} - \frac{Z_{kj}Z_{ki}}{Z_{kk} + z_C} \quad (16)$$

并联电容器投入后, 换流站 j 对换流站 i 的交互因子 $MIIF'_{ij}$ 计算式为

$$MIIF'_{ij} = \frac{\left| \frac{Z'_{ji}}{Z'_{jj}} \right|}{\left| \frac{Z_{ji}}{Z_{jj}} \right|} = \frac{Z_{ji}(Z_{kk} + z_C) - Z_{kj}Z_{ki}}{Z_{jj}(Z_{kk} + z_C) - Z_{kj}^2} \quad (17)$$

并联电容器投入前后, 换流站 j 对换流站 i 的交互因子的变化量为

$$MIIF'_{ij} - MIIF_{ij} = \frac{Z_{ji}(Z_{kk} + z_C) - Z_{kj}Z_{ki}}{Z_{jj}(Z_{kk} + z_C) - Z_{kj}^2} - \frac{Z_{ji}}{Z_{jj}} = \frac{Z_{kj}(Z_{ji}Z_{kj} - Z_{jj}Z_{ki})}{Z_{jj} \left[Z_{jj}(Z_{kk} + z_C) - Z_{kj}^2 \right]} \quad (18)$$

在基于 IEEE-39 修改的交直流混合系统中, Bus-33 和 Bus-35 是直流换流母线, 在 Bus-22 节点接入不同容量的并联电容器补偿, 直流环流母线 Bus-35 对 Bus-33 的多馈入交互因子计算值及其相对变化率变化情况如表 1 所示。

表 1 系统接入不同容量补偿时多馈入交互因子计算值

Table 1 Calculated value of MIIF with different shunt capacitor capacities

并联电容器补偿容量/Mvar	多馈入交互因子变化率	
	$MIIF_{33,35}$	$\Delta MIIF_{33,35}\%$ (相对不投入补偿)
0	0.258	0.0%
50	0.258	0.0%
100	0.259	0.4%
150	0.260	0.8%
200	0.262	1.6%
250	0.264	2.3%

计算结果表明, 随着并联电容器补偿容量的增

大, 多馈入交互因子值在逐渐增大, 但增加幅度小。当接入容量增大到 250 Mvar 时, 多馈入交互因子的增大幅度仅为 2.3%。因此可以认为, 并联电容器对交互因子的影响有限, 并联电容器补偿的变化对系统的不利影响很难通过多馈入交互因子体现出来。

2.3 多馈入短路比指标与并联电容器补偿的关系

综合上述分析, 并联补偿对交互因子的作用可以忽略, 多馈入有效短路比仅与短路容量有关。当系统中电容补偿较为集中时, 常规基于网络的短路电流计算方法无法准确反映大量集中补偿容量的变化, 与之直接相关的多馈入有效短路比也同样对补偿容量不敏感。因此, 多馈入有效短路比无法评估这些并联电容器对交直流系统电压稳定的不利影响。而基于潮流的短路电流计算方法, 由于其基于潮流结果的实际电压值并根据叠加法计算短路电流^[24], 电容补偿的接入将改变系统中原有无功潮流分布, 导致补偿点邻近节点的电压升高, 最终由电压升高带来的短路电流增加将抵消大部分电容补偿接入所导致的短路电流减小, 评判系统电压稳定的多馈入有效短路比指标因而也会出现无法准确计及并联电容补偿对电压稳定的恶化影响的现象。

基于 2016 年浙江电网方式数据(含溪浙和宁浙两条特高压直流), 很容易找出两种运行方式方案 1 和方案 2, 方案 2 较方案 1 具有更多的并联电容器补偿。由于并联补偿容量的不同导致两个运行方式下的系统电压稳定性存在差异, 对系统进行 $N-1$ 故障校验, 方案 1 满足 $N-1$ 原则, 而方案 2 存在失稳故障, 可知方案 2 系统的电压稳定性因为并联补偿的投入而降低。分别计算两种方式下的换流站的多馈入短路比指标, 其计算值如表 2。

表 2 两种不同方式下多馈入有效短路比计算值

Table 2 MESCR results of two different cases

运行方式	系统无功补偿量/Mvar	$N-1$ 校验失稳故障数	换流站处短路容量/MW	等效直流功率/MW	多馈入有效短路比	
					金华站	绍兴站
方案 1	16 326	0	35 378	12 538	2.82	3.27
方案 2	17 221	4	35 203	12 544	2.81	3.27

由表 2 可知, 相较于方案 1, 方案 2 系统中投入更多的并联补偿, 系统稳定性下降。并联补偿容量的增大, 使得换流站处的短路容量值微弱的降低, 而等效直流功率的变化更不明显, 最终导致两种方式下多馈入有效短路比指标的差异几乎可以忽略不计。故短路比指标的计算值并不能准确反映出系统实际电压稳定性的变化情况。实际算例的数据结果也印证了上述关于现有多馈入短路比指标与并联电容器补偿的关系的分析。

3 计及并联电容补偿影响的多馈入短路比

针对现有多馈入有效短路比的局限性, 本文在多馈入有效短路比的基础上, 同时考虑了除直流换流站自身无功补偿外系统中其他集中的并联电容器补偿的影响, 提出了一种改进多馈入短路比指标。

多直流馈入系统中, 并联电容补偿主要由两部分组成: 一部分是换流站处的无功补偿装置, 这部分无功补偿集中且容量较大, 因此这部分补偿在对自身直流落点处的电压稳定有较大影响的同时, 也会影响系统中其他直流系统的电压稳定性; 另一部分并联电容补偿则是分散在系统各节点的接地电容器组, 单个容量不大, 其对各直流落点电压稳定的影响主要由补偿点到直流落点间的电气距离决定。

为了能够在短路比计算中充分计及上述两种电容补偿装置对多直流馈入系统电压稳定的影响, 本文提出一种将系统中任意节点无功补偿容量折算到直流落点的方法。假定系统中直流落点为节点 i , 无功补偿接入点为节点 j , 节点 j 并联无功容量为 Q_{Cj} 的电容器, 如图 3 中所示。

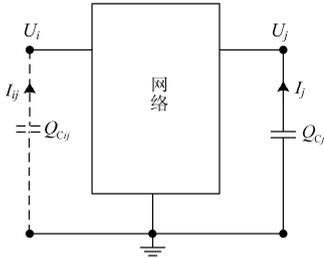


图 3 交流系统中两节点并联电容补偿折算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of converting shunt capacitor's capacity of one node to another

将节点 j 并联电容容量 Q_{Cj} 折算到节点 i 处无功功率 Q_{Cij} 的方法如下所述。

节点 j 注入电流 I_j 时在节点 i 上产生的电压 U_{ij} 为

$$U_{ij} = I_j Z_{eqij} = (I_j \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}}) Z_{eqii} \quad (19)$$

式中, Z_{eqij} 为节点 i 、 j 间的互阻抗。

与此同时, U_{ij} 又可表示为 j 节点注入折算电流 I_{ij} 时, 在 j 节点自身产生的电压为

$$U_{ij} = I_{ij} Z_{eqii} \quad (20)$$

从而可得, 将节点 j 注入电流 I_j 折算到节点 i 的折算电流 I_{ij} 的表达式为

$$I_{ij} = I_j \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \quad (21)$$

因此, 可将节点 j 上容量为 Q_{Cj} 的并联电容折

算到节点 i 处, 折算后节点 i 并联电容容量 Q_{Cij} 有

$$Q_{Cij} = U_i I_{ij}^* = U_j I_j^* \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| = Q_{Cj} \left| \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} \right| \quad (22)$$

其中, 定义 Z_{eqij}/Z_{eqii} 为节点 j 到节点 i 的无功折算因子, 其反映了两节点间无功影响的程度。

由式(22)可以得到系统中任意节点的并联电容器补偿容量折算到直流落点处的无功补偿量。将系统中各电容补偿都折合到直流落点后, 便能够方便地计及并联电容对系统电压稳定带来的不利影响。因此, 利用与计算有效短路比相似的原理, 将多馈入短路比计算式(4)中短路容量 S_{aci} 减去折算到该节点的无功补偿总量, 定量描述并联电容器在暂态过程中对多馈入系统的不利影响, 同时更为准确地评估多直流馈入系统的电压稳定性。因此, 所提出的改进多馈入有效短路比 IMESCR 计算公式为

$$I_{IMESCR_i} = \frac{S_{aci} - \sum_{j=1}^n Q_{Cij}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^k MIIF_{ji} \cdot P_{dj}} = \frac{S_{aci} - (Q_{ci} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{Z_{eqij}}{Z_{eqii}} Q_{Cj})}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^k MIIF_{ji} \cdot P_{dj}} \quad (23)$$

式中: n 为系统节点总数; k 为多馈入系统中所馈入的直流线路数。

基于多馈入临界短路比及 IEEE 提出的利用传统单馈入短路比划分交直流系统强弱的标准^[5], 本文所提改进指标并不影响交直流系统的电压稳定极限, 因此改进指标沿用多馈入有效短路比判断多馈入交直流系统强弱的标准如下^[25]: 1) 强系统, $IMESCR > 2.5$; 2) 弱系统, $1.5 < IMESCR \leq 2.5$; 3) 极弱系统, $IMESCR \leq 1.5$ 。

4 算例分析

4.1 算例 1: 新英格兰系统

为了分析验证本文所提出的计及系统中并联电容器补偿影响的多馈入短路比指标的有效性, 本文基于修改的 IEEE 39 节点算例系统进行验证。修改方式如下: 保持系统潮流不变, 将节点 33、35 的发电机替换为经换流站接入的直流系统, 形成两馈入交直流系统, 如图 4 所示。仿真环境为 PSD-BPA, 直流系统采用准稳态模型, 短路电流计算基于 PSD-SCCP 程序, 采用基于潮流的短路电流算法, 并计及并联电容补偿。

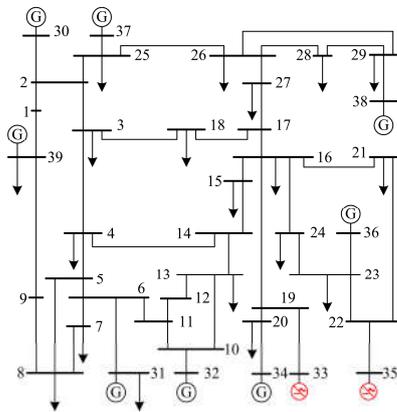


图 4 含两馈入直流的新英格兰测试系统

Fig. 4 Two-infeed AC/DC New England test system

4.1.1 多馈入短路比与补偿容量的关系

为分析补偿容量对多馈入短路比的实际影响，构造了多个算例，分别在系统中的 Bus-22 接入不同容量的并联电容器补偿，观察不同补偿容量下的系统的电压稳定性和指标计算值变化情况，系统电压稳定性由 $N-1$ 故障校验结果表征，短路比指标计算值如表 3 所示。

表 3 不同容量并联电容器补偿时两直流落点的有效短路比和改进有效短路比计算结果

Table 3 Results of MESCR and IMESCR of two DC termination with different shunt capacitor capacities

补偿容量/ Mvar	电压失稳 故障个数	Bus 33		Bus 35	
		MESCR	IMESCR	MESCR	IMESCR
0	0	2.71	2.62	2.67	2.59
50	0	2.71	2.60	2.67	2.55
100	0	2.71	2.58	2.67	2.51
150	1	2.71	2.56	2.66	2.48
200	1	2.70	2.54	2.66	2.46
250	2	2.70	2.53	2.66	2.42

将表 3 中的数据绘制在同一坐标系中，得到有效短路比与改进有效短路比随补偿容量的变化曲线，如图 5 所示。

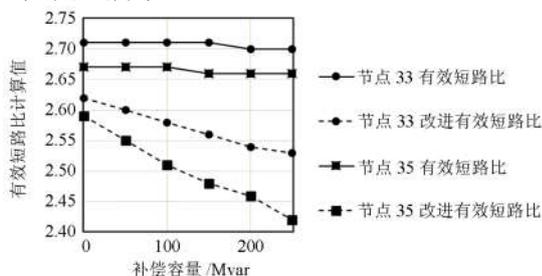


图 5 两直流落点的有效短路比和改进有效短路比随并联电容器补偿容量变化

Fig. 5 Variation of MESCR and IMESCR of two DC termination versus shunt compensation capacity

从表 2 和图 5 可以看出：

(1) 随着系统投入补偿容量增加，系统的电压失稳故障个数逐步增加，系统的电压稳定性不断减弱；

(2) 多馈入有效短路比的值随并联电容器补偿量增加的基本没有变化，不能反映系统电压稳定性的变化；

(3) 改进多馈入有效短路比值随并联电容器补偿量增加而减小，与系统电压稳定性的变化趋势一致。

4.1.2 多馈入短路比与补偿点位置的关系

通过将 200 Mvar 并联电容器分别接入距离两直流落点不同电气距离的节点上，构造不同的系统来观察不同接入点下的系统的电压稳定性和指标计算值变化情况，短路比指标计算结果如表 4 所示。表 4 中折算因子即是补偿点和直流落点之间的互阻抗与直流落点的自阻抗比值，其值越高表示补偿点距离直流落点越近。

表 4 不同并联电容器补偿点时直流落点 Bus-35 的有效短路比和改进有效短路比计算结果

Table 4 Results of MESCR and IMESCR of DC termination Bus-35 with different capacitor locations

补偿接入点	补偿点对直流落点的无功折算因子	电压失稳故障个数	多馈入有效短路比	改进多馈入有效短路比
不投入	\	0	2.66	2.59
Bus-1	0.077	0	2.66	2.58
Bus-3	0.170	0	2.66	2.56
Bus-15	0.281	0	2.66	2.54
Bus-24	0.360	0	2.66	2.52
Bus-23	0.519	1	2.66	2.49
Bus-22	0.653	1	2.66	2.46

将表 4 的两种短路比计算结果绘制在同一坐标系中，其中横坐标为补偿点到直流落点的电气距离，如图 6 所示。

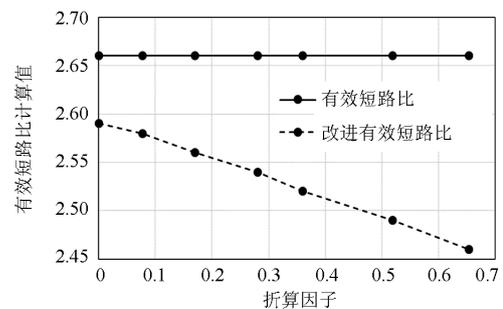


图 6 直流落点 Bus-35 的有效短路比和改进有效短路比随补偿点位置变化

Fig. 6 Variation of MESCR and IMESCR of DC termination bus-35 versus compensated location

由表 4 和图 6 的结果, 可得出以下分析:

(1) 接入相同容量的并联电容器补偿, 补偿点离直流落点越近, 系统的电压稳定性越弱, 即补偿对交直流系统带来的不利影响作用强弱与补偿点到直流落点的电气距离有关。

(2) 多馈入有效短路比随补偿点位置的变动而发生的基本没有变化, 不能很好地反映补偿点不同时系统的电压稳定强弱变化。

(3) 改进多馈入有效短路比值随着补偿点靠近直流落点而减小, 能够反应补偿点位置不同给系统带来的不利影响程度。

4.2 算例 2: 浙江电网

为了验证本文所提出的改进短路比用于评估实际电力系统电压稳定情况的有效性, 本节以浙江电网 2016 夏典型运行方式为基础, 构造了一系列交流系统由强到弱的运行方式, 分别计算了其多馈入有效短路比指标、改进多馈入有效短路比指标, 以及各算例的 $N-1$ 校验情况。

4.2.1 浙江电网算例简介

随着 2016 年宁浙直流的投运, 加之目前已投入运行的溪浙特高压直流, 届时浙江电网将会形成两条特高压直流同时馈入的局面, 同时浙江所处的华东电网还有龙政、锦苏、宜华直流等多条直流馈入, 浙江电网网架结构如图 7 所示。由于直流之间的相互影响, 对浙江电网的两条直流进行研究则要保留华东电网其他地区的网架。典型算例下, 浙江电网负荷 2016 年夏预计达到 6850 万 kW, 溪浙、宁浙特高压直流均以额定 800 万 kW 功率送入, 由福建外送浙江的功率为 500 万 kW。

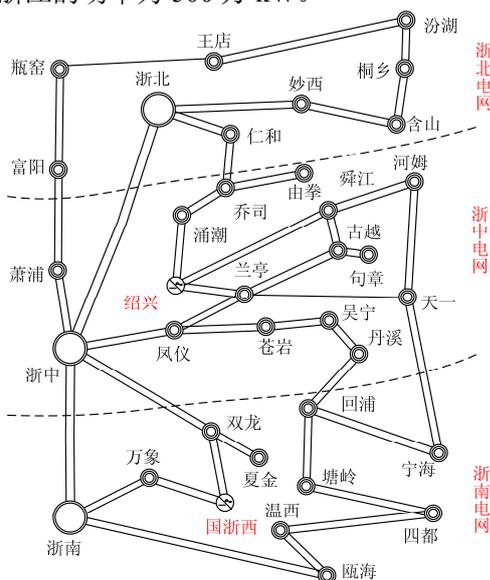


图 7 浙江电网简化图

Fig. 7 Schematic diagram of Zhejiang power grid

4.2.2 场景构建

为了验证本文提出的改进短路比指标分别用于评估不同强度系统的有效性, 本节在浙江电网典型强系统方式的基础上进行修改, 分别构造了 5 组计算场景。具体构造方式为: 保持直流输送功率不变的情况下, 关闭直流落点近区的发电机组, 以减弱直流落点近区的电压支撑能力, 同时为了保持系统功率平衡, 开启等额有功功率的远区发电机组, 并在直流落点近区投入一定量的并联电容器来维持系统电压。

基础方式以及构造场景依次编号 Case1-5, 其运行方式以及故障校验的结果如表 5 所示, 表中的数据除失稳故障个数外其他均为与 Case1 相对值。

表 5 算例修改情况(相对于 Case1)以及故障校验结果

Table 5 $N-1$ simulation results of all cases and their

differentiations from Case1

运行方式	浙南机组 关机/MW	关闭机组 无功调节 量/Mvar	投入无 功补偿/ Mvar	电压失 稳故障 个数
Case1	0	0	0	0
Case2	3161	1557	895	0
Case3-少补偿	5044	2564	401	0
Case3-多补偿	5044	2564	1841	4
Case4	5966	2930	2021	15
Case5	6936	3412	2561	17

系统的 $N-1$ 校验结果往往能够直观表现出系统的电压稳定情况, 因此本文对浙江电网线路进行 $N-1$ 故障校验, 并将结果作为各算例的实际稳定性评价标准。系统的 $N-1$ 故障集包括浙江电网所有 500 kV 和 1000 kV 线路的前后侧故障, 故障形式为三相短路永久性故障, 故障 0.09 s 线路近端断开, 故障发生后 0.1 s 后线路远端跳开。

以上结果表明随着直流落点近区发电机组地不断关闭, 电压失稳故障的个数逐步增加, 系统强度逐渐降低。

4.2.3 所提 IMESCR 指标有效性分析

分别采用多馈入有效短路比和改进短路比方法计算浙江电网溪浙直流在不同运行方式下的指标值, 计算结果如表 6 所示。

将各个算例下的三个短路比计算值绘制在同一坐标系中, 如图 8 所示, 可以更直观地对比它们的差别。

由表 6 和图 8 可以看出:

(1) 系统的短路容量会随着近区发电机组的关闭而减小, 导致短路比指标值降低, 表明系统对直流系统的支撑作用减弱;

表 6 各算例有效短路比和改进有效短路比计算值

Table 6 MESCR and IMESCR results of all cases

运行方式	关机量/ MW	无功 补偿量/ Mvar	短路 容量/ MW	有效 短路比	改进有效 短路比	
					只计及 换流站	计及 全系统
Case1	0	16 326	37 803	3.08	3.02	2.75
Case2	3161	17 221	36 381	2.95	2.89	2.66
Case3-少补偿	5044	16 787	35 378	2.82	2.75	2.48
Case3-多补偿	5044	18 227	35 203	2.81	2.76	2.38
Case4	5966	18 407	35 469	2.82	2.76	2.35
Case5	6936	18 947	35 275	2.80	2.74	2.32

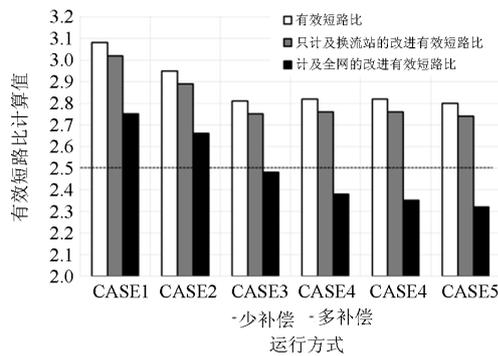


图 8 多馈入有效短路比与改进指标对比

Fig. 8 Comparison between MESCR and IMESCR

(2) 各算例下有效短路比计算值要明显高于弱系统的边界值 2.5, 然而多个算例系统实际的电压稳定性却较低, 如算例 Case3-多补偿、Case4、Case5 均不满足 $N-1$ 原则;

(3) 只计及换流站并联电容器无功补偿的改进有效短路比计算值虽然相对传统有效短路比计算值小, 但是仍然不能准确地表征系统的强弱程度, 因此有必要考虑全系统并联电容器的影响。

(4) 改进有效短路比相对传统有效短路比计算值有较大幅度的减小, 特别是投入大量并联电容器补偿的运行方式下, 其指标值低于 2.5, 已属于弱系统范畴, 与故障校验的结果吻合。

5 结论

本文提出一种能够计及并联电容器补偿的改进多馈入有效短路比指标, 得出的主要结论如下:

(1) 并联电容器补偿的接入会给交直流系统的电压稳定性带来不利影响, 且补偿容量越大, 补偿点位置与直流落点越近, 影响程度越大;

(2) 现有多馈入有效短路比指标对换流站以外的并联电容器补偿不敏感, 补偿容量以及补偿点的变化难以反映到有效短路比指标值上, 会导致出现

对交直流系统强度的评判结果过于乐观的情况;

(3) 提出了一种计及全系统并联电容器影响的改进有效短路比指标, 并给出了基于改进多馈入有效短路比的系统强度评判标准。该改进指标值会随着补偿容量增大而减小, 随着补偿点接近直流落点而减小, 与系统电压稳定性变化趋势相同。相比于现有多馈入有效短路比, 本文所提出的改进有效短路比能够计及并联电容器的影响, 可以更准确的评判交直流系统电压稳定性。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 新一代电网中多源多变换复杂交直流系统的基础问题[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 1-14.
XIAO Xiangning. Basic problems of the new complex AC-DC power grid with multiple energy resources and multiple conversions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 1-14.
- [2] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [3] 郭磊, 张英敏, 李兴源. 多通道高压直流广域改进射影控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 29-35.
GUO Lei, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Design of multi-channel wide area modified projective controller for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 29-35.
- [4] 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 1: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [5] 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[C] // Paris, France: CIGRE, 1997.
- [6] 陈江澜, 张蓓, 兰强, 等. 特高压交直流混合电网协调电压控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 21-27.
CHEN Jianglan, ZHANG Pei, LAN Qiang, et al. Research on strategy and simulation of coordinated automatic voltage control for UHVDC/AC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 21-27.
- [7] 肖俊, 李兴源, 冯明, 等. 多馈入交直流系统无功补偿装置的布点[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2638-2643.
XIAO Jun, LI Xingyuan, FENG Ming, et al. Determination of installation sites for reactive compensation devices in

- multi-infeed AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2638-2643.
- [8] 黄俊辉, 汪惟源, 王海潜, 等. 基于模拟退火遗传算法的交直流系统无功优化与电压控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 37-43.
HUANG Junhui, WANG Weiyuan, WANG Haiqian, et al. Study of hybrid genetic algorithm and annealing algorithm on reactive power optimization and voltage control in AC/DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 37-43.
- [9] 裴岳, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [10] PAULO F D T, BERNT B, GUNNAR A. Multiple infeed short circuit ratio-aspects related to multiple HVDC into one AC network[C] // Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [11] 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.
- [12] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源, 等. 基于无功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): 74-85.
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): 74-85.
- [13] 周勤勇, 刘玉田, 汤涌. 计及直流权重的多直流馈入落点选择方法[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3336-3341.
ZHOU Qinyong, LIU Yutian, TANG Yong. A method to select terminal locations in multi-infeed HVDC power transmission system considering weights of HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3336-3341.
- [14] DENIS L H A, ANDERSSON G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1427-1437.
- [15] 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(7): 64-68.
LIN Weifang, TANG Yong, GUO Xiaojiang. Analysis of influencing factors of short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 64-68.
- [16] 黄弘扬, 徐政, 许烽. 多馈入直流输电系统短路比指标的有効性分析[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.
- [17] 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.
- [18] IEEE Std 1036™-2010 IEEE guide for application of shunt power capacitors[S]. New York: IEEE Press, 2010.
- [19] DAVIES J B. CIGRE WG B4. 41 report: systems with multiple DC infeed[R]. CIGRE ELECTRA, 2007.
- [20] NAYAK R N, SASMAL R P. AC/DC interactions in multi-infeed HVDC scheme: a case study[C] // Power India Conference. 2006.
- [21] YUAN X H, DAI X B. Energy-saving analysis for power system reactive power compensation[J]. Advanced Materials Research, 2013: 608-609, 1151-1155.
- [22] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [23] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [24] 姚淑玲, 田华. 基于BPA和PSASP程序的短路电流计算比对[J]. 电力系统自动化, 2010, 35(14): 112-115.
YAO Shuling, TIAN Hua. A comparison between BPA and PSASP software programs for calculating short-circuit currents[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 35(14): 112-115.
- [25] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 50-55.
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Transient voltage stability analysis of East China receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2011, 35(12): 50-55.

收稿日期: 2016-03-31; 修回日期: 2016-08-25

作者简介:

刘青(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: tsingleo@foxmail.com

廖诗武(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: liaoshiwu@gmail.com

姚伟(1983-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、柔性直流输电系统及其控制、风力发电系统的非线性控制。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)