

新能源发电集群的改进等效短路比计算方法

朱凌志^{1,2}, 曲立楠^{1,2}, 刘纯^{1,2}, 陈宁^{1,2}

(1. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 江苏省南京市 210003;

2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 100192)

摘要: 短路比是衡量电源接入点并网强度的重要指标,低短路比并网的新能源电站发生振荡、电压失稳等问题的风险较高。文中首先针对新能源集群并网的场景,分析了常用的加权短路比、复合短路比以及等效短路比等计算方法的适用性及其不足,提出了一种考虑新能源无功出力、静止无功发生器、阻抗角以及初始相位角的改进的新能源集群等效短路比计算方法。然后,基于简单网络证明了所提计算方法与常规短路比的相互关系,分析了无功补偿方式对等效短路比的影响。最后,结合典型算例和实际新能源基地经特高压直流送出工程,开展了基于改进等效短路比的电网强度评估应用研究,并进一步分析了分布式调相机对于加强新能源电站并网点强度的作用。

关键词: 新能源集群; 电网强度; 短路比; 弱电网; 宽频带稳定

0 引言

随着能源消费转型,清洁能源占比逐渐攀升,以风电、光伏发电为主的新能源发电发展迅速。截至2020年,全国风电累计装机容量为280 GW,光伏累计装机容量为250 GW,风电和光伏装机容量占发电总装机容量的24.97%。中国西北、华北、东北等地区已形成了多个兆瓦级新能源集群集中开发并经特高压直流输电集中外送场景。部分新能源基地由于缺乏常规水电、火电等同步发电机组的支撑,电网强度弱,暂态电压失稳、宽频带振荡等稳定问题突出,新能源消纳和送出能力受限。“十四五”期间,中国新能源装机容量将进一步扩大,传统同步机组电源装机容量的占比持续降低,新能源集群接入地区电网强度低将成为“三北”地区新能源开发面临的普遍问题。

电力电子设备接入弱电网的稳定性问题已有较多研究,主要集中在发生机理、抑制方法等方面^[1-2],对于单一设备的研究,一般将短路比作为衡量电网强弱的主要指标^[3]。而对于多电力电子设备接入下电网强弱程度的判别方法,早期主要被用于多馈入短路比评价多条高压直流输电馈入受端电网的场景^[4-6]中。大规模新能源集群接入弱电网带来的宽频带振荡、谐波等稳定性问题日益突出^[7],如何评价

集群接入下电网的强弱程度也成为近年来研究的热点问题之一。文献[8]提出了用于初步筛选大型风电场次同步振荡风险的聚合短路比(ASCR)的概念,该方法考虑了风电场和风电机组数量等因素,但对各个风电场、风电机组之间的影响如何量化未做深入研究;文献[9-10]推导了电力电子设备单馈入系统短路比与其稳定性的联系,提出了量化多馈入系统电网强度的广义短路比(gSCR)指标,并证明了多馈入与单馈入系统在临界失稳指标计算数值上的一致性;文献[11]进一步提出了风电场gSCR的在线监测方法;文献[12]利用gSCR分析了多直流接入电力系统的稳定性。gSCR的理论较为严谨,但在处理实际大规模电网时,如何对复杂电网和无功补偿设备进行建模方面的研究尚不深入。

国际大电网工作组CIGRE B4.62对实际工程中常用的弱电网评价方法进行了全面总结,提出了单一风电场并网强度的评估方法^[13-15]。对于多风电场集群接入情况,介绍了多种常用的短路比计算方法,包括复合短路比(CSCR)、加权短路比(WSCR)、等效短路比(ESCR)等。这些方法仅考虑网络的特性而不考虑电力电子设备自身的设备,具备较好的工程实用价值。

本文重点以国际大电网会议(CIGRE)文献为基础,分析上述3种短路比计算方法的适用性及不足。在此基础上,结合新能源并网和运行特征,提出改进的ESCR计算方法及加权ESCR指标,分析无功补偿对ESCR的影响。然后,结合典型案例和实际工

收稿日期: 2021-01-26; 修回日期: 2021-05-17。

上网日期: 2021-08-11。

国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900100)。

程开展了新能源集群并网强度分析的应用研究。

1 新能源集群的短路比分析及适应性

1.1 WSCR

WSCR是一个衡量新能源集群总体并网强度的指标,美国得克萨斯州曾采用该指标辅助计算关键断面逆变器接口电源的电力传输极限^[16],其计算方法如式(1)所示。

$$K_{\text{WSCR}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{ki} P_i}{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right)^2} \quad (1)$$

式中: K_{WSCR} 为WSCR值; S_{ki} 为新能源电站*i*的短路容量; P_i 为新能源电站*i*的有功出力; n 为新能源电站数量。

值得注意的是,相关文献及本文所提短路比主要用于评估运行阶段的电网强度,一般采用新能源电站的实际出力作为短路比计算的参考而不是装机容量。对于规划阶段的电网强度评估,可采用电站装机容量乘以同时率系数作为短路比计算的参考。

1.2 CSCR

CSCR的计算原理是将新能源集群内的所有机组接入一个虚拟的公共并网点,计算该公共并网点的短路容量 S_k ,并除以新能源集群的总体出力得到,如式(2)所示。

$$K_{\text{CSCR}} = \frac{S_{k,\text{eq}}}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (2)$$

式中: K_{CSCR} 为CSCR值; $S_{k,\text{eq}}$ 为新能源集群聚合等值系统在虚拟公共并网点处的短路容量。

因此,计算CSCR的主要工作在于将新能源集群等值为一个单站接入系统,如图1所示。对于简单辐射状网络比较容易,但对于结构比较复杂的网络则难度较大。

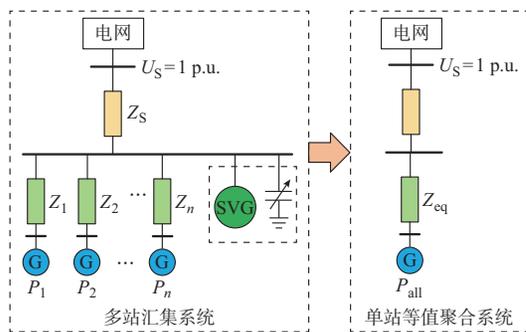


图1 新能源电站汇集接入系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of collection access system for renewable energy power plant

图1中: U_s 为系统侧电压; Z_s 为新能源汇集站侧的系统阻抗; Z_1 至 Z_n 为新能源电站至汇集站的阻抗; P_{all} 为新能源电站的等值功率; Z_{eq} 为新能源电站至汇集站的等值阻抗。

1.3 ESCR

ESCR的计算思路与直流输电多馈入短路比类似,均是在短路比计算过程中考虑不同厂站之间的电压交互影响,其计算方法如式(3)所示。

$$K_{\text{ESCR},i} = \frac{S_{ki}}{P_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n P_j r_{ji}} \quad (3)$$

式中: $K_{\text{ESCR},i}$ 为新能源电站*i*的ESCR值; r_{ji} 为新能源电站*j*和新能源电站*i*之间的电压交互影响系数,具体表达式如式(4)所示。

$$r_{ji} = \frac{\Delta V_j}{\Delta V_i} = \frac{Z_{ji}}{Z_{ii}} \quad (4)$$

式中: ΔV_j 和 ΔV_i 分别为新能源电站*j*和新能源电站*i*电压的变化值; Z_{ii} 为新能源电站*i*的自阻抗; Z_{ji} 为新能源电站*j*与新能源电站*i*之间的互阻抗。

1.4 各类短路比指标算例分析

为分析各类短路比指标的有效性以及计算差异,本文构建了一个简单的光伏发电汇集接入系统,见图2(a)。其中,光伏总装机容量为9 000 MW,分为5个等值电站(PV1至PV5)接入750 kV变电站系统,5个电站的装机容量分别为3 000 MW、3 000 MW、1 000 MW、1 000 MW和1 000 MW,各个电站及其汇集系统的网络参数完全对称(相同容量电站的变压器和线路参数完全一致,不同容量电站的变压器和线路阻抗与电站容量成反比)。

同时,作为对比,构建了一个单光伏电站的等值系统,如图2(b)所示。由于是参数一致的完全对称系统,理论上讲,图2(a)中的5个光伏电站感受到的电网强度应该完全一致,并且和图2(b)中的等值光伏电站(PV6)相同。由于单机系统下使用短路比作为评价接入点电网强度的依据已经获得广泛认可,因此图2(b)的短路比指标可以作为评价各类短路比指标有效性的参考依据。

由于实际系统中,稳定性问题主要由风电机组、光伏逆变器等电源的控制引起,而这些电源只能感受到出口处(设备并网点)的电网强度,因此针对设备出口处短路比的评估具备直接指导意义。设定上述算例系统各个光伏电站的出力均为0.8 p.u.,计算图2(a)和(b)系统中各个光伏逆变器出口处的短路比、ESCR以及图2(a)系统的集群WSCR、CSCR,结果如表1所示。

由算例结果可见,在系统结构、参数完全对称的

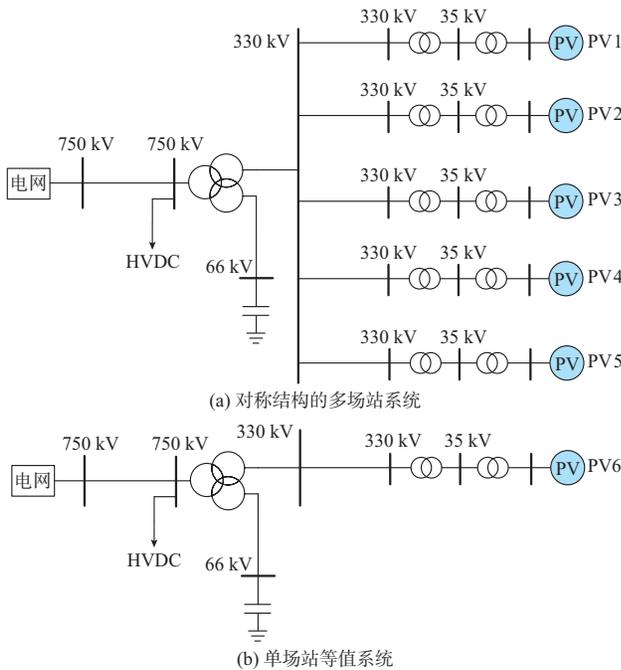


图2 简单20节点系统结构
Fig. 2 Structure of a simple 20-bus system

表1 简单20节点系统中各类短路比计算结果
Table 1 Calculation results of various short-circuit ratios in a simple 20-bus system

电站	短路容量/MVA	总有功出力/MW	SCR	ESCR	WSCR	CSCR
PV1	8 439.7	2 400	3.517	1.792		
PV2	8 439.7	2 400	3.517	1.792		
PV3	4 142.3	800	5.178	1.792	0.973	1.792
PV4	4 142.3	800	5.178	1.792		
PV5	4 142.3	800	5.178	1.792		
单站系统	12 902.0	7 200	1.792			

情况下,对于包含多场站的新能源集群,常规短路比的计算结果明显大于ESCR。容量越小的新能源电站,其常规短路比计算值越大,而ESCR的计算结果与等值系统的短路比一致。因此,可以说明ESCR的计算结果能够更加真实地反映新能源机组感受到的真实电网强度。

对于衡量集群总体并网强度的指标WSCR和CSCR,由计算结果可以看出,系统WSCR的计算值明显小于等值系统的短路比,而CSCR的计算值与等值系统的短路比一致。

进一步分析电站数量对WSCR计算值的影响。本文分别将图2(b)系统9 000 MW等值光伏电站拆分为3个3 000 MW和9个1 000 MW的电站,对应的WSCR计算结果为1.172和0.575。

WSCR是基于短路容量的一种加权平均算法,

在分母上引入了平方项,缺乏明确的物理含义。由结果可见,对于同样规模的新能源集群,由于分母平方项的存在,导致电站的数量越多,WSCR的计算值越小,这与实际情况以及通常的认知不符。因此,本文认为采用WSCR的具体数值来评价新能源集群的并网强度意义不大,而ESCR和CSCR的计算数值具有参考价值。

2 改进的新能源集群ESCR计算方法

2.1 ESCR和CSCR指标的不足

由1.4节的算例和分析可以看出,对于新能源集群的并网强度分析,ESCR和CSCR是2个相对可信的指标,但在实际应用中,这2个指标仍然存在很多不足,主要包括以下几个方面。

1)ESCR和CSCR的计算公式仅考虑了新能源发电的有功出力,忽略了无功出力对其的影响。

2)实际系统中,几乎所有的风电场/光伏电站都会配置一定比例(20%~30%)的静止无功补偿器(SVC)/静止无功发生器(SVG)来补偿无功损耗。而SVG与光伏类似,是电流源控制的逆变器接口并网设备,面临由于电网强度不足导致的稳定性问题,其并网点电网强度也需要关注。现有ESCR和CSCR的计算方法均无法准确考虑这个因素。

3)ESCR公式中交互影响因子的计算仅考虑了自阻抗与互阻抗的模的比值,未考虑不同位置新能源阻抗角的差异,这对于实际系统新能源非对称接入方式下的计算会产生影响。

4)实际运行中,不同位置的新能源机组并网点电压相角存在差异,特别是在分布距离较远、出力差异较大的情况下,如不考虑这些差异,会得出相对负面的结论。

5)CSCR是一个衡量集群总体并网强度的指标,但计算时需要将所有新能源电站等值到一个母线上,这对于网络结构复杂、参数不一致的实际系统而言,其等值参数计算难度极大。

2.2 改进的ESCR计算方法

根据2.1节对ESCR和CSCR计算方法不足的分析,本文提出了一种适用于新能源集群的改进ESCR计算方法,主要改进如下。

1)采用复数形式的交互影响因子计算方法,考虑机组并网点之间阻抗角以及初始相位角的影响。

2)采用视在功率 $\dot{S} = P + jQ$ 代替有功出力 P 进行ESCR计算,即将新能源机组的无功出力 Q 考虑在内。

3)将SVG作为单独的电源点参与ESCR计算,

其出力为 $0 + jQ$ 。这样能够充分考虑 SVG 出力对新能源机组稳定性的影响以及 SVG 自身并网点的强度。

具体计算式如(5)所示。

$$K_{\text{ESCR},i} = \frac{S_{ki}}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{S}_j \dot{r}_{ji} \right|} \quad (5)$$

式中: $\dot{S}_i = P_i + jQ_i$ 为电流源 i 的视在功率; \dot{r}_{ji} 为节点 j 和节点 i 之间的复交互影响系数,计算公式如式(6)所示。

$$\dot{r}_{ji} = \frac{\dot{Z}_{ji} \frac{\dot{U}_j}{|\dot{U}_j|}}{\dot{Z}_{ii} \frac{\dot{U}_i}{|\dot{U}_i|}} \quad (6)$$

式中: \dot{Z}_{ji} 为节点 j 和节点 i 之间的互阻抗; \dot{Z}_{ii} 为节点 i 的自阻抗; \dot{U}_j 和 \dot{U}_i 分别为节点 j 和节点 i 的电压。

当各个电流源之间的电气距离较近、相角差较小时, \dot{r}_{ji} 的计算可忽略电压相角差部分,即

$$\dot{r}_{ji} = \frac{\dot{Z}_{ji}}{\dot{Z}_{ii}} \quad (7)$$

ESCR 计算的是集群中每个机组并网点的强度指标,但无法反映集群的总体特性。本文提出了一种反映集群总体并网强度的加权 ESCR(WESCR) 指标,计算公式如式(8)所示。

$$K_{\text{WESCR}} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n K_{\text{ESCR},i} \dot{S}_i \right|}{\left| \sum_{i=1}^n \dot{S}_i \right|} \quad (8)$$

由式(5)和式(6)可以看出,当新能源汇集系统网络结构对称、参数一致,新能源电站仅发出有功功率时,改进 ESCR 计算结果与常规 ESCR 计算结果应完全一致,具体计算流程如下。

1) 计算各个新能源电站并网点的短路容量。基于给定的运行方式,通过潮流计算得到各母线电压幅值、相角,发电机的有功、无功出力等信息。选择需分析的新能源电站集群,集群内所有双馈/直驱型风电机组、光伏逆变器、储能变流器以及 SVG 均视为电流源型电源,记录其有功、无功出力和电压幅值/相角等信息。采用基于潮流的短路电流计算方法,得到各个电流源出口的短路电流初始值 I_k ,并计算短路容量 S_k 。计算时应忽略所需分析的集群内的其他电流源对该电流源并网点短路电流的额外贡献。

2) 计算新能源集群内各个电流源电压的复交

互影响因子。建立系统的扩展导纳矩阵,考虑电力系统中的线路、变压器、并联电容/电抗器、串联补偿等无源器件,同步发电机取其暂态电抗纳入导纳矩阵,逆变器接口的风电/光伏/储能/ SVG 等电源不考虑其阻抗; SVC 按照投入的电容/电抗值纳入导纳矩阵,负荷的恒阻抗部分以及感应电动机模型部分的暂态电抗纳入导纳矩阵,直流换流站阀组部分等值为阻抗纳入导纳矩阵。对导纳矩阵求逆得到扩展阻抗矩阵,提取集群内各个电流源节点的自阻抗 \dot{Z}_{ii} 和互阻抗 \dot{Z}_{ji} ,根据式(6)计算各个电流源之间的电压复交互影响因子。

3) 按式(5)和式(8)计算各个电流源的 ESCR 和集群的 WESCR。ESCR 和 WESCR 可用于评价集群内各个电流源并网点以及集群总体的电网强度。ESCR 和 WESCR 越小表明该电流源并网点或集群总体的电网强度越低,发生稳定问题的风险越高。

2.3 ESCR 与常规短路比的对比分析

对于如图 1(a)所示的简单辐射状新能源汇集系统,设系统侧电压 $U_s = 1 \text{ p.u.}$,则可计算出新能源电站 i 的短路容量 S_{ki} 为:

$$S_{ki} = \frac{U_s U_s}{\left| \dot{Z}_s + \dot{Z}_i \right|} = \frac{1}{\left| \dot{Z}_s + \dot{Z}_i \right|} \quad (9)$$

式中: \dot{Z}_s 为新能源汇集站侧的系统阻抗; \dot{Z}_i 为新能源电站 i 至汇集站的阻抗。

由自阻抗和互阻抗的物理含义不难推导出该汇集系统中新能源电站 i 的并网点自阻抗为:

$$\dot{Z}_{ii} = \dot{Z}_s + \dot{Z}_i \quad (10)$$

新能源电站 j 和新能源电站 i 之间的互阻抗为:

$$\dot{Z}_{ji} = \dot{Z}_{ij} = \dot{Z}_s \quad (11)$$

设 $\dot{S}_{\text{all}} = \sum_{j=1}^n \dot{S}_j$,忽略相角差的影响,可进一步推导出:

$$K_{\text{ESCR},i} = \frac{S_{ki}}{\left| \dot{S}_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n \dot{S}_j \frac{\dot{Z}_{ji}}{\dot{Z}_{ii}} \right|} = \frac{1}{\left| \dot{Z}_s + \dot{Z}_i \right|} \cdot \frac{1}{\left| \dot{S}_i \dot{Z}_i + \dot{S}_{\text{all}} \dot{Z}_s \right|} \quad (12)$$

由式(12)可见, $K_{\text{ESCR},i}$ 的分母可分为2个部分:第1部分是 $\dot{S}_i \dot{Z}_i$,体现了新能源电站 i 及其独占的阻抗对短路比的单独影响;第2部分是 $\dot{S}_{\text{all}} \dot{Z}_s$,体现了集群中所有电源及其共享的阻抗对短路比大小的共同影响。

当各个电源到汇集站的阻抗完全一致且出力也相同,即图1(a)为完全对称系统时, $K_{ESCR,i}$ 与聚合后系统(如图1(b)所示)的常规短路比计算值完全一致。

2.4 无功补偿方式对ESCR的影响

新能源电站常见的无功补偿方式包括安装SVC、SVG以及利用风电机组或光伏逆变器自身容量产生无功补偿等,如图1(a)所示。

SVC本质上是晶闸管控制的投切电容/电抗器,计算短路比时,应将其按照投入的电容/电抗值纳入导纳矩阵。设其阻抗为 X_c ,一般情况下 $|X_c| > |Z_s|$, $|X_c| > |Z_i|$ 。当补偿方式为容性($X_c < 0$)时,可推导出机端的自阻抗和互阻抗都会增加,各个电源之间的交互影响因子也会增大。

SVG是一种电流源控制方式的电力电子电源,应作为单独的电源参与ESCR的计算,其出力仅包含虚部,此时参与ESCR计算的电流源数量会增加。

利用新能源机组自身容量实现无功补偿,不会改变参与ESCR计算时的电流源数量,但计算时每个电流源的出力包含了实部有功功率和虚部无功功率。

3 算例分析验证

3.1 简单测试系统算例分析

结合实际新能源集群的接线和汇集方式,对1.4节中的简单测试系统进行改进,保持总装机容量不变,将光伏电站集群分为A和B两个集群,集群A为四级升压汇集送出系统,光伏逆变器经两级升压至110 kV,并通过110 kV线路接入系统330 kV汇集站的110 kV侧,再经330 kV线路输送到系统750 kV变电站的330 kV侧。集群B为三级升压汇集送出系统,光伏逆变器经两级升压至330 kV,经330 kV线路直接接入系统750 kV变电站的330 kV侧。集群A的每个电站配置了20%装机容量的SVG,集群B的无功补偿则由35 kV侧的可投切电容器实现。系统节点数量共27个,网络结构如图3所示。

各光伏电站出力均按80%额定容量设定,无功出力为0;配置SVG的电站的SVG无功出力为电源有功出力的10%。基于上述工况对各个电源进行ESCR计算,包括常规的ESCR计算方法和改进的ESCR计算方法。

由表2潮流结果可见,该算例系统不同节点之间的相角差极小,最大仅为 9° ;根据阻抗矩阵计算结果可以看出,本算例系统各个光伏和SVG并网点自

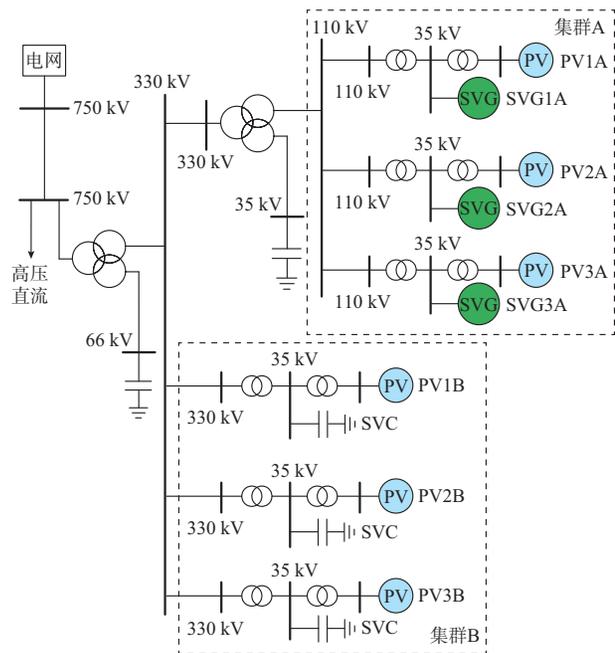


图3 27节点系统结构

Fig. 3 Structure of a 27-bus system

阻抗以及各并网点之间互阻抗的相角在 $82.8^\circ \sim 85.4^\circ$ 之间,同样很小。因此,可以预见阻抗角以及电压相位角对ESCR计算的结果影响较小。

由表2的计算结果表明,由于考虑了阻抗角和初始相角影响,改进的ESCR计算结果略大一些。由于该系统中,各个电源之间的阻抗角、初始相角差别很小,因此,改进ESCR计算结果与常规的ESCR计算方法十分接近。对大系统进行分析发现,当电站之间阻抗角和相角差异较大时,计算结果差别可达10%左右。集群A由于是采用0.4 kV—35 kV—110 kV—330 kV四级升压的方式接入,相比三级升压的集群B,电气距离更远,因此ESCR的值也相对较小。

3.2 实际电网算例分析

以中国某特高压直流为例,该直流是国际上首条全清洁能源外送的特高压直流工程,直流送端近区电源全部是风电和光伏发电,无同步电源支撑。直流换流站安装了4台300 Mvar的同步调相机,用于抑制直流闭锁导致的系统交流母线暂态过电压。由直流换相失败/闭锁导致的近区新能源机端暂态过电压也成为制约新能源消纳的主要因素。为提高送端新能源集群的稳定性,本文利用ESCR方法分析了不同无功补偿模式下送端新能源集群的并网点强度,并分析了分布式调相机对新能源集群并网点强度的提升作用。

采用2020年夏季大负荷、水电小开机、直流外送功率4 000 MW为基础运行方式,直流送端近区风

表2 系统潮流和ESCR计算结果
Table 2 Calculation results of power flow and ESCR of system

电源	$P + jQ/\text{MVA}$	电压/p.u.	相角/(°)	S_k/MVA	ESCR	改进ESCR	
						无SVG	含SVG
PV1A	1 600+j0	1.042 65	25.00	5 980.9	1.481 4	1.483 8	1.480 3
PV2A	1 600+j0	1.042 65	25.00	5 980.9	1.481 4	1.483 8	1.480 3
PV3A	1 120+j0	1.050 10	26.09	4 564.7	1.443 7	1.445 9	1.441 9
PV1B	800+j0	1.032 79	17.75	4 521.6	1.827 0	1.830 9	1.831 6
PV2B	800+j0	1.032 79	17.75	4 521.6	1.827 0	1.830 9	1.831 6
PV3B	1 280+j0	1.032 37	18.33	5 950.8	1.791 9	1.795 4	1.795 9
SVG1A	j160	1.035 54	22.73	7 036.9			1.566 3
SVG2A	j160	1.035 54	22.73	7 036.9			1.566 3
SVG3A	j112	1.043 02	23.85	5 456.5			1.522 7

电场和光伏电站共83个,通过12个330 kV汇集站上送至3个750 kV变电站,总出力为7 670 MW,其中风电出力为1 890 MW,光伏出力为5 780 MW,新能源电站无功补偿设备为SVC或可投切电容器,风电机组和光伏逆变器保持功率因数为1。系统基本拓扑和各汇集站的新能源出力如图4所示。

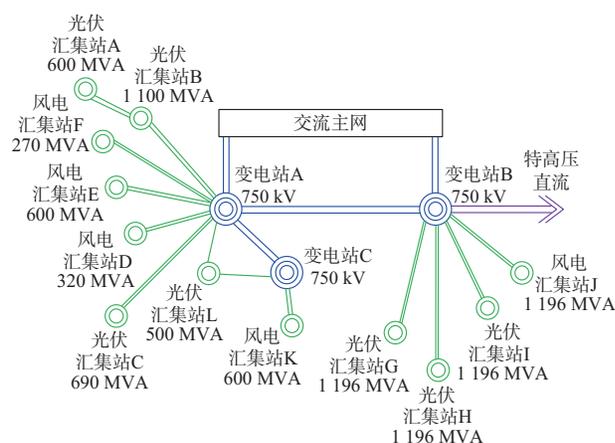


图4 特高压直流送端新能源集群交流电网
Fig. 4 AC power grid of renewable energy clusters at ultra-high voltage DC sending end

3.2.1 ESCR分析

对该运行方式进行ESCR分析,各个集群中的计算结果如表3所示。可以发现,该运行方式下,如果用常规短路比计算结果评价电网强度,结果在4~10之间,会得出乐观的结论;而各个电站的ESCR计算结果在1.2~2.0之间,集群总体加权ESCR为1.413 7,说明该地区电网已经非常薄弱。实际全电磁暂态仿真也发现,该地区暂态过电压(系统故障下部分新能源机端暂态过电压分析如附录A所示)、宽频带振荡失稳等问题较为突出,这说明ESCR能够更加真实地反映集群接入下新能源电站的电网强度。

3.2.2 无功补偿方式影响分析

提升新能源接入点的电网强度是提高系统稳定性的有效手段,本节分析新能源电站不同无功补偿方式对ESCR的影响。将算例中的SVC补偿更换为SVG补偿以及风电机组和光伏逆变器自身发出无功功率这2种模式并进行对比研究。采用新能源机组自身发出无功功率的模式时,基本原则是维持35 kV侧电压水平与SVG补偿时基本一致,各新能源机组的无功输出约为有功功率的10%。结果如表3所示。

由计算结果可见,利用SVG补偿和利用机组自身能力补偿无功功率这2种模式,新能源电站的整体ESCR水平均有明显提升。其中,利用机组和逆变器自身能力发出无功功率的模式与采用SVG补偿的模式相比,其ESCR的水平总体更高。在采用SVG补偿的模式下,集群的加权ESCR与采用机组发无功功率的模式相比略高,主要是因为SVG由于接在35 kV电压等级上,自身的ESCR水平比机组略高,因此提高了集群整体的加权ESCR水平。

3.2.3 分布式调相机影响分析

近年来,利用小型分布式调相机(50 Mvar)同时实现无功补偿和过电压抑制成为工业界研究的热点。在图4实际算例系统中,已规划在具备建设条件的330 kV汇集站G、H、I和L安装15台50 Mvar的分布式调相机。分别安装5、4、2、4台总容量为750 Mvar的调相机,约为新能源总容量的10%。本文进一步分析调相机对新能源集群接入点电网强度的改善作用。

调相机是同步发电机,在等值电路上体现为含感性内阻抗的电压源,接入后会提升新能源的短路容量,同时减少自阻抗和互阻抗,理论上对ESCR会有提升作用,其提升幅度与其容量和参数有关。以SVC补偿方式为基础方式开展对比分析,计算结果如表4所示。

表3 部分新能源电站 ESCR 的计算结果
Table 3 Calculation results of ESCR for some renewable energy power plants

汇集站	电站	P/MW	S _k /MVA	SCR	不同补偿模式下的 ESCR		
					SVC	SVG	风电或光伏
光伏汇集站 A	PV-A1	100	703.7	7.036 7	1.407 3	1.512 1	1.550 8
光伏汇集站 B	PV-B1	50	261.1	5.221 0	1.170 0	1.236 4	1.311 7
	PV-B2	40	208.0	5.201 0	1.265 0	1.343 1	1.416 8
光伏汇集站 C	PV-C1	100	429.8	4.298 1	1.257 3	1.372 4	1.389 8
	PV-C2	90	716.0	7.955 3	1.461 8	1.572 0	1.612 5
风电汇集站 D	WF-D1	80	603.3	7.541 2	1.356 4	1.492 2	1.485 4
风电汇集站 E	WF-E1	120	855.5	7.129 5	1.216 4	1.340 6	1.357 5
风电汇集站 F	WF-F1	90	433.6	4.817 4	1.362 1	1.435 1	1.497 8
光伏汇集站 G	PV-G1	150	818.6	5.457 3	1.417 2	1.477 5	1.568 7
	PV-G2	99	685.1	6.920 3	1.418 7	1.479 1	1.570 4
光伏汇集站 H	PV-H1	150	853.8	5.692 3	1.554 3	1.614 1	1.711 8
	PV-H2	200	1 934.9	9.674 4	1.999 4	2.128 7	2.177 3
光伏汇集站 I	PV-I1	150	817.4	5.449 1	1.524 6	1.608 4	1.676 0
风电汇集站 J	WF-J1	100	667.8	6.677 7	1.888 6	1.982 6	2.060 4
风电汇集站 K	WF-K1	100	712.6	7.126 4	1.416 0	1.555 6	1.549 7
光伏汇集站 L	PV-L1	100	720.0	7.199 8	1.358 4	1.443 4	1.502 9
WESCR					1.413 7	1.559 7	1.558 4

表4 分布式调相机作用对比
Table 4 Effect comparison of distributed condensers

电站	无调相机		有调相机		提升率/%	
	SCR	ESCR	SCR	ESCR	SCR	ESCR
PV-A1	7.036 7	1.407 3	7.243 2	1.622 0	2.9	15.3
PV-B1	5.221 0	1.170 0	5.375 4	1.325 2	3.0	13.3
PV-B2	5.201 0	1.265 0	5.348 4	1.444 9	2.8	14.2
PV-C1	4.298 1	1.257 3	4.464 7	1.437 7	3.9	14.3
PV-C2	7.955 3	1.461 8	8.255 6	1.695 8	3.8	16.0
WF-D1	7.541 2	1.356 4	7.613 8	1.525 0	1.0	12.4
WF-E1	7.129 5	1.216 4	7.362 2	1.380 2	3.3	13.5
WF-F1	4.817 4	1.362 1	4.981 3	1.566 1	3.4	15.0
PV-G1	5.457 3	1.417 2	6.327 3	2.082 6	15.9	47.0
PV-G2	6.920 3	1.418 7	7.848 4	2.085 7	13.4	47.0
PV-H1	5.692 3	1.554 3	6.502 8	2.228 3	14.2	43.4
PV-H2	9.674 4	1.999 4	10.595 4	2.803 1	9.5	40.2
PV-I1	5.449 1	1.524 6	6.323 2	2.211 6	16.0	45.1
WF-J1	6.677 7	1.888 6	6.844 0	2.387 1	2.5	26.4
WF-K1	7.126 4	1.416 0	7.299 1	1.608 7	2.4	13.6
PV-L1	7.199 8	1.358 4	8.186 6	1.848 2	13.7	36.1
WESCR		1.413 7	1.809 7	28.0		

15台分布式调相机接入后,新能源并网点常规短路比提升水平在1%~16%之间,只有安装分布式调相机的汇集站下属新能源电站的提升幅度在10%以上。而ESCR水平提升幅度在12%~47%之间,安装分布式调相机的汇集站下属新能源电站

的提升幅度均在40%以上,新能源集群总体的加权ESCR提升幅度也达到了28%。

由分析结果可见,分布式调相机的安装对于ESCR的提升作用非常显著,是改善新能源集群接入下电网强度的有效措施。从本算例中分析可以发现,从提升新能源集群并网强度角度来看,系统中最为薄弱的区域为汇集站A和E下属新能源电站,这些电站的ESCR提升幅度不是特别明显,分布式调相机的安装位置并不合理。

4 结语

本文分析了常用的评价新能源集群并网强度的WSCR、CSCR以及ESCR计算方法的适用性,指出WSCR对于评价并网点强度意义不明确,不建议使用,CSCR和ESCR在计算和使用方面存在一定的不足。本文提出的改进ESCR和加权ESCR计算方法,能够计及无功补偿设备、新能源自身无功功率、阻抗角、初始相位角的影响,并能给出集群的整体并网强度指标,相比常规ESCR方法具有更好的精度和全面性。理论和算例分析发现,新能源自身提供无功支撑,相比采用SVG和SVC进行无功补偿的方式,能够在一定程度上提升并网点ESCR水平。而分布式调相机对于ESCR的提升效果明显,但与其安装位置密切相关。

本文提出的改进ESCR方法主要从电网自身角

度评价新能源集群并网点强度,具有较好的工程指导意义。但其在判别系统宽频带小扰动稳定性风险方面,仍然存在一定的局限性,需要进一步深入研究,如ESCR计算中应该考虑的新能源集群合理范围如何界定,不对称以及不同类型新能源接入的条件下系统面临失稳的临界短路比如何确定等。此外,如何利用ESCR指标确定可再生能源的最大接纳能力,也是一个值得研究的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

- [1] 年珩,杨洪雨.不平衡运行工况下并网逆变器的阻抗建模及稳定性分析[J].电力系统自动化,2016,40(10):76-83.
NIAN Heng, YANG Hongyu. Impedance modeling and stability analysis of grid-connected inverters under unbalanced operation conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 76-83.
- [2] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [3] 康勇,林新春,郑云,等.新能源并网变换器单机无穷大系统的静态稳定极限及静态稳定工作区[J].中国电机工程学报,2020,40(14):4506-4515.
KANG Yong, LIN Xinchun, ZHENG Yun, et al. The static stable-limit and static stable-working zone for single-machine infinite-bus system of renewable-energy grid-connected converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4506-4515.
- [4] 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.
- [5] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed [R]. Cigre, 2018.
- [6] 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.
GUO Xiaojiang, TANG Yong, GUO Qiang, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISCR index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 69-74.
- [7] 姜齐荣,王玉芝.电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J].中国电机工程学报,2020,40(22):7185-7201.
JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [8] 毕天姝,李景一.基于聚合短路比的大型风场次同步振荡风险初筛[J].电力系统保护与控制,2019,47(5):52-59.
BI Tianshu, LI Jingyi. Risk screening of SSO induced in large-scale wind farms based on aggregated short circuit ratio [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 52-59.
- [9] 辛焕海,董炜,袁小明,等.电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J].中国电机工程学报,2016,36(22):6013-6027.
XIN Huanhai, DONG Wei, YUAN Xiaoming, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [10] 辛焕海,甘德强,鞠平.多馈入电力系统广义短路比:多样化新能源场景[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5514-5524.
XIN Huanhai, GAN Deqiang, JU Ping. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5514-5524.
- [11] HUANG L B, XIN H H, LI Z Y, et al. Identification of generalized short-circuit ratio for on-line stability monitoring of wind farms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 3282-3285.
- [12] 汪家铭,张静,杨建华,等.基于广义短路比的多馈入直流系统受端电网结构优化方法[J].电力系统自动化,2020,44(24):111-118.
WANG Jiaming, ZHANG Jing, YANG Jianhua, et al. Optimization method of receiving-end AC grid structure for multi-infeed DC system based on generalized short-circuit ratio [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 111-118.
- [13] BECH J. Connection of wind farms to weak AC networks [R]. Cigre, 2016.
- [14] NERC. Integrating inverter-based resources into weak power systems [R]. NERC, 2017.
- [15] ZHANG Y, HUANG S H F, SCHMALL J, et al. Evaluating system strength for large-scale wind plant integration [C]// 2014 IEEE PES General Meeting/Conference & Exposition, July 27-31, 2014, National Harbor, USA.
- [16] GE Energy Consulting. Fernandes report to NERC ERSTF for composite short circuit ratio (CSCR) estimation guideline [R]. 2015.

朱凌志(1975—),男,通信作者,博士,研究员级高级工程师,主要研究方向:新能源发电建模仿真及运行控制。E-mail:zhulingzhi@epri.sgcc.com.cn

曲立楠(1985—),女,硕士,高级工程师,主要研究方向:新能源发电建模仿真分析。

刘纯(1968—),男,研究员级高级工程师,主要研究方向:新能源发电技术。

(编辑 鲁尔姣)

Improved Calculation Method of Equivalent Short-circuit Ratio for Power Generation Cluster of Renewable Energy

ZHU Lingzhi^{1,2}, QU Linan^{1,2}, LIU Chun^{1,2}, CHEN Ning^{1,2}

(1. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China;

2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: Short-circuit ratio (SCR) is an important indicator to measure the grid-connected strength of power access points. The probability of oscillation and voltage instability for renewable energy power plants connected to the grid with low SCR is higher. First, for the scenario of the grid-connected renewable energy cluster, this paper analyzes the applicability and deficiencies of calculation methods of weighted SCR, composite SCR and equivalent SCR that are commonly used. An improved equivalent SCR calculation method for the renewable energy cluster considering reactive power output of renewable energy, static var generators, impedance angle and initial phase angle is proposed. Then, based on a simple network, the relationship between the proposed calculation method and the conventional SCR is proven, and the influence of the reactive power compensation method on the equivalent SCR is analyzed. Finally, combined with typical calculation examples and actual renewable energy base with ultra-high voltage DC transmission project, assessment and application study of power grid strength based on improved equivalent SCR is carried out, and the effect of distributed condensers on strengthening the grid-connected point strength of renewable energy power plants is further analyzed.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: renewable energy cluster; power grid strength; short-circuit ratio (SCR); weak power grid; broadband stability

