

基于短路比指标的风电汇集系统稳定性分析

吴林林,李蕴红,于思奇,孙雅旻,王 潇,杨艳晨,邓晓洋,苏田宇,孙大卫

(国网冀北电力科学研究院 国家电网公司风光储联合发电运行技术实验室,北京 100045)

摘要:短路比(SCR)是一种描述“系统强弱”的指标,目前电力系统运行部门正在探索应用SCR指标评估风电汇集系统稳定性的方案。为探究SCR在风电汇集系统稳定性工程化评估过程中的价值,分析SCR指标的适用范围与条件,基于主流风电机组厂家控制器实物开展研究,考虑实际风电机组特性,分析应用SCR指标评估风电汇集系统静态电压稳定、暂态过电压和次/超同步振荡3类稳定问题的适用性。研究发现:提升系统SCR指标可不同程度地缓解上述3类稳定问题的严重程度;若在评估过程中不考虑风电机组的特性差异,则SCR指标难以准确反映上述3类问题的系统稳定裕度。

关键词:风电;短路比;静态电压稳定;暂态过电压;宽频振荡;故障穿越

中图分类号:TM 614;TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205030

0 引言

风电汇集地区一般地处偏远,近区同步机组数量有限^[1-2],局部地区已呈现风电并入弱交流电网特征^[3]。2012年5月,张家口沽源地区风电汇集系统在无任何系统故障的情况下,电压发生大幅波动,造成风电机组脱网,风电场接入系统强度较弱是导致这次电压波动的原因之一^[4]。2011年2—4月,西北地区发生了几次由局部交流短路故障导致的风电连锁脱网事故,“系统强度较弱导致无功-电压灵敏度较高”是导致脱网事故扩大的主要原因^[5]。2015年7月,新疆哈密山北地区风电场出现次同步振荡问题,相关文献指出发生振荡的原因之一是风电场所接入的系统强度较弱^[6]。可见,风电接入弱电网所导致的静态电压失稳、暂态过电压和次/超同步振荡问题^[7],已成为限制风电送出通道输电极限、制约风电消纳能力的关键因素^[8]。

短路比SCR(Short Circuit Ratio)是度量电力电子设备(如直流设备和新能源发电设备等)并网系统的电网强度以及分析系统稳定裕度的重要指标之一^[9]。传统的SCR概念仅使用交流电网参数和设备容量,使用较为简单^[10]。SCR自1992年由CIGRE工作组提出后^[11],一直被广泛应用于评估直流馈入系统的静态稳定水平^[12]。近年来,借鉴SCR对于直流馈入系统稳定性分析的经验,国内外逐渐将SCR相关指标推广到风电汇集系统的规划和运行中。最新颁布的国家强制性标准GB 38755—2019《电力系统

安全稳定导则》明确要求新能源场站SCR应达到合理水平^[13-14]。澳大利亚电网要求新能源发电设备需在接入点SCR为1.5的系统条件下能够稳定运行^[15]。

从静态电压稳定、暂态过电压和次/超同步振荡三方面,梳理应用SCR指标评估系统稳定性的已有研究如下。在静态电压稳定方面,文献[16]针对单直流馈入系统,提出了系统在低SCR水平运行时的失稳机理,明确了SCR与静态电压稳定判据的关系,估算了静态电压临界稳定时的临界短路比CSCR(Critical Short Circuit Ratio)。文献[17]针对多直流馈入系统,提出了多馈入短路比MISCR(Multi-Infeed Short Circuit Ratio)指标,从数学上证明了MISCR判断多馈入直流系统静态电压稳定的有效性。文献[4,18]借鉴SCR在直流系统中的应用思路,提出了适用于分析新能源并网系统静态电压稳定的SCR指标。在暂态过电压方面,文献[19]指出风电汇集地区的输电线路发生短路故障后,风电场进入低电压穿越,向电网输出无功电流。故障清除时,电网电压迅速恢复,风电场输出无功电流回撤不及时进而产生无功盈余,将导致风电机组机端出现暂态过电压。文献[18-19]指出系统的SCR指标越小,上述暂态过电压问题越严重。文献[18]的仿真结果表明,并网点SCR指标小于1.15的新能源机组,在短路故障清除后机端过电压达到1.564 p.u.,而同一区域内SCR大于1.8的机组,机端过电压在相同故障条件下仅为1.2 p.u.。在次/超同步振荡方面,文献[20-21]给出小干扰稳定意义下广义SCR的定义,针对异构多电力电子装置馈入系统(多个控制特性不同的电力电子装置),从数学上证明了应用广义SCR判断次/超同步振荡失稳的有效性。基于现有研究可知SCR的设计目的为在不考虑设备具体控制的前提下,提供一种描述“系统强弱”的方法,用以评

收稿日期:2021-11-25;修回日期:2022-03-29

在线出版日期:2022-04-13

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(52018K21N00H)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(52018K21N00H)

估系统稳定性。该方法的优点是简单易行,但是风电汇集系统的稳定性除了与“系统强弱”有关,还与风电机组自身特性密切相关^[22],若希望使 SCR 指标对评估实际工程稳定性具有显著的借鉴意义,需在不同的风电机组特性接入条件下,分析 SCR 指标用于评估系统稳定水平的准确性,明确 SCR 指标的适用范围与条件。

综上,本文分析了风电机组无功特性对采用 SCR 评估静态电压稳定准确性的影响。对于采用 SCR 评估暂态过电压和次/超同步振荡问题,基于主流风电机组厂家控制器实物展开研究,考虑工程中应用的风电机组特性,分析了 SCR 评估过电压和振荡问题的准确性,从而为电网运行部门使用 SCR 指标评估实际风电汇集系统的稳定性提供参考经验。

1 SCR 评估风电汇集系统静态电压稳定

电力系统网络某点的短路容量等于该点三相短路电流与额定电压的乘积,是系统强度的标志^[9]。系统短路容量与电气设备(含电力电子设备)容量的比值即为 SCR 的传统定义。文献^[11,16]针对单直流馈入系统提出了 SCR 和运行短路比 OSCR (Operating Short Circuit Ratio) 的计算方法分别如下:

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

$$V_{OSCR} = S_{ac}/P_d \quad (2)$$

式中: V_{SCR} 为 SCR 的数值; V_{OSCR} 为 OSCR 的数值; S_{ac} 为换流母线的短路容量(认为直流不贡献短路容量); P_{dN} 为额定直流功率; P_d 为直流运行功率; Z 和 Z_B 分别为直流接入的交流系统的等值阻抗和对应的阻抗基值; Z_{pu} 为 Z_B 的标幺值; U_N 为换流母线的额定电压。

根据式(1)定义的传统 SCR 指标,对任意单电源馈入系统的静态电压稳定判断都具有参考意义^[18]。以单风电场馈入系统为例,其示意图如图 1 所示。图中: $U_{wind} \angle \delta_{wind}$ 为风电场机端电压; P_{wind} 和 Q_{wind} 分别为风电场输出有功和无功功率; $E_{sys} \angle 0^\circ$ 为无穷大电网电压; X_{line} 为线路连接电抗。

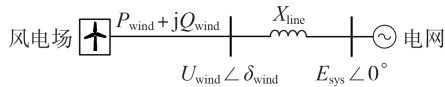


图 1 单风电场馈入系统的示意图

Fig.1 Schematic diagram of single wind farm fed to system

若忽略送出线路电阻,则系统功率传输关系为:

$$\begin{cases} P_{wind} = \frac{E_{sys} U_{wind} \sin \delta_{wind}}{X_{line}} \\ Q_{wind} = \frac{E_{sys} (E_{sys} - U_{wind} \cos \delta_{wind})}{X_{line}} \end{cases} \quad (3)$$

消去中间变量 δ_{wind} , 且令 E_{sys} 为额定电压, 得:

$$P_{wind} = \frac{\sqrt{-U_{wind}^4 + 2Q_{wind}X_{line}U_{wind}^2 + U_{wind}^2 - Q_{wind}^2X_{line}^2}}{X_{line}} \quad (4)$$

式(4)决定了风电场输出有功功率与机端电压、线路电抗、无功功率之间的关系,附录 A 图 A1 给出了 $X_{line}=0.2$ p.u. 和 $X_{line}=0.5$ p.u. 条件下的系统 PV 曲线,图中 U_{wind} 和 P_{wind} 均为标幺值。由图可知,若 X_{line} 越小(SCR 越大),风电场输出无功功率越大,则有功传输极限越大。由式(4)和图 A1 可推断,提升风电汇集系统的 SCR,可有助于提升静态电压稳定约束下的系统送出极限。

根据国家强制性标准 GB 38755—2019《电力系统安全稳定导则》要求,新能源场站 SCR 应达到合理水平。在实际运行中以 CSCR 作为判断系统稳定裕度依据,为计算系统送出极限提供参考。即针对某一特定的风电汇集系统,希望得到某个 CSCR 数值,保障在该 CSCR 数值之上时,系统能够稳定运行。

文献^[11-21]等多篇文献针对不同的系统参数得到了不同的 CSCR 数值,一般在 1.5~2.5 范围内。本文以图 1 所示的单风电场馈入系统为研究对象,单馈入系统是多馈入系统研究的基础,且多风电机组馈入系统在风电机组特性一致的前提下,可通过节点削减方法等值为单馈入系统^[21]。以 $V_{OSCR}=V_{CSCR}=2.5$ 为条件确定系统送出极限,分析该送出极限下系统是否会出现静态电压失稳问题。根据式(2)与式(4),设 $Q_{wind}=0$ 且 E_{sys} 为额定电压,则 $V_{OSCR}=2.5$ 时所对应的系统送出极限为 $0.4/X_{line}$ (X_{line} 为标幺值),由式(4)可知,当 $P_{wind}=0.4/X_{line}$ 时,总有 $dP_{wind}/dU_{wind}<0$,说明系统静态电压稳定,进而一定程度上说明“应用 CSCR 为确定送出极限提供参考”是有效的。

为说明“应用 CSCR 评估稳定性”是否有效,以图 1 所示的系统为研究对象,以 $V_{OSCR}<V_{CSCR}=1.5$ 为条件确定系统运行方式①,以 $V_{OSCR}>V_{CSCR}=2.5$ 为条件确定系统运行方式②,若方式①下系统静态电压失稳且方式②下系统静态电压稳定,可一定程度上说明“应用 CSCR 评估稳定性”是有效的。由“应用 CSCR 为确定送出极限提供参考”是否有效的分析过程可知,方式②下,系统静态电压稳定。下面分析方式①下的情况。根据式(2)与式(4),设 $Q_{wind} \in [0, 0.3]$ p.u. 且 E_{sys} 为额定电压,则 $V_{OSCR}=1.5$ 时所对应的系统送出极限 P_{SCR} 如附录 A 图 A2 中黄色曲面所示,由式(4)表征静态电压稳定约束 ($dP_{wind}/dU_{wind}=0$) 下的送出极限 P_{limit} 如图 A2 中蓝色曲面所示,图中各变量均为标幺值。

由图 A2 可知,当 P_{SCR} 所对应曲面高于 P_{limit} 所对应曲面时,说明按照 $V_{OSCR}=1.5$ 给出的送出极限运行,系统静态电压失稳,进而可推断此时“应用 CSCR 评

估稳定性”是有效的,原因是方式①下系统失稳且方式②下系统稳定。但分析图A2可知,存在 P_{limit} 所对应曲面高于 P_{SCR} 所对应曲面的工况,这些工况下,按照 $V_{\text{OSCR}}=1.5$ 给出的送出极限运行,系统可以保持静态电压稳定,说明此时CSCR的评估结果是偏保守的,即根据CSCR判断系统会发生失稳的工况下,实际系统可能是稳定的。附录A图A3给出了CSCR评估结果偏保守的工况范围,其为图A2的俯视图。

由图A3可知,当 X_{line} 和 Q_{wind} 同时较大时,CSCR评估结果有误。这说明若不考虑风电机组无功特性,应用CSCR难以准确评估系统静态电压稳定性。

风电机组的无功特性会影响CSCR的使用效果,风电汇集系统中不同风电机组的无功特性可能存在差异,因此难以用仅表征电网拓扑信息的SCR指标判断多台风电机组馈入后的系统稳定性。为避免上述问题,提供一种实际工程中进行电网安全计算的思路如下:对风电汇集地区中不同的风电机组机型进行统计,根据机组特性选择其中一种对静态电压稳定最不利的机型替代其他机型,将风电汇集地区风电机组机型统一,并利用戴维南等值原则将风电汇集地区等效为单风电机组馈入系统,再应用SCR指标判断系统稳定性。

2 SCR评估暂态过电压水平

风电汇集地区发生短路故障后,风电机组进入低电压穿越并发出无功电流。故障清除时电网电压恢复,若风电机组输出无功电流回撤不及时,则可能造成无功盈余,导致风电机组机端出现暂态过电压。文献[18]指出SCR指标与上述暂态过电压问题有明显关联。但未见有文献报道如何应用SCR指标评估风电汇集地区的暂态过电压水平。针对上述问题,本文选择2020年市场占有率靠前的风电机组厂家,每个厂家选择一种典型机型开展电磁暂态仿真,研究SCR与暂态过电压间的关系。以单风电机组馈入系统为研究对象,算例系统示意图如图2所示。

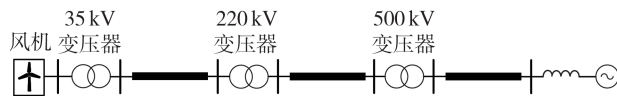


图2 研究SCR与暂态过电压间关系的算例系统

Fig.2 Example system for studying relationship between SCR and transient overvoltage

图2中,35、220、500 kV变压器分别采用FZB-40.5/0.69-3800、SFZ11-200000/220、ODF10-167000/500这3种变压器型号的典型参数,35、220、500 kV线路分别采用LGJ-150、2XLGJQ-300、4XLGJ-400/50这3种线路型号的典型参数。

风电机组采用动态链接库封装DLL(Dynamic Link Library)方法建模。基于DLL的仿真模型可包

含实际风电机组的完整控制算法与参数、实际保护策略与参数,以保证数字模型控制环节的准确性^[23]。为验证基于DLL的风电机组仿真模型的准确性,在电磁暂态仿真中构建单台风电机组接入无穷大系统的仿真模型,参照文献[24]对于型式试验工况与检测方法的要求,对比三相电压跌落至0.2 p.u.持续625 ms过程中,仿真与型式试验结果如图3所示,图中机端电压幅值 U_{wind} 、有功功率 P 、无功功率 Q 均为标么值。

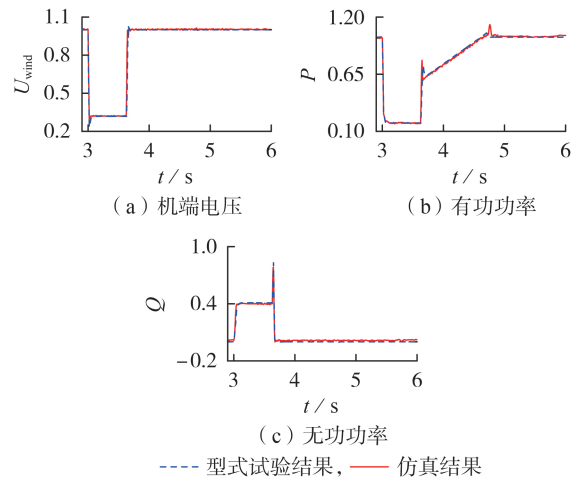


图3 仿真与型式试验结果对比

Fig.3 Comparison between simulative results and type test results

由图3可知,该机型的风电机组DLL模型的仿真结果与型式试验结果基本一致,验证了基于DLL的风电机组模型的有效性,需要说明的是,风电机组电压穿越特性为设计厂家机密,本文隐去所建模和试验的风电机组厂家与型号,用机型代码以示区分。本文研究涉及的8个厂家的风电机组DLL模型均与对应机型型式试验结果进行了对比,仿真模型与型式试验结果的误差满足NB/T 31066—2015《风电机组电气仿真模型建模导则》的误差要求^[25],限于篇幅,仅给出1台风电机组DLL模型的验证结果。

基于经过验证的风电机组仿真模型,根据图2所示的仿真结构,在500 kV线路设置单相瞬时性或三相接地故障,通过仿真得到风电机组在不同SCR下和不同故障条件下的机端电压基波正序分量 u_{wind}^+ (标么值)与瞬时值 u_{wind} (标么值),如图4、5所示。不同SCR的实现方法为:基于华北某风电汇集地区不同风电场的送电路长度,通过设置图2中35、220、500 kV线路长度,实现风电机组机端SCR为1.4和2.6的2种工况(此处的SCR采用传统定义)。

基于已验证的8种风电机组DLL模型,重复进行上述仿真,总结8种机型的风电机组在单相瞬时性和三相故障条件下的机端电压正序分量峰值和瞬时值峰值结果,分别如表1、2所示。同时选择机端

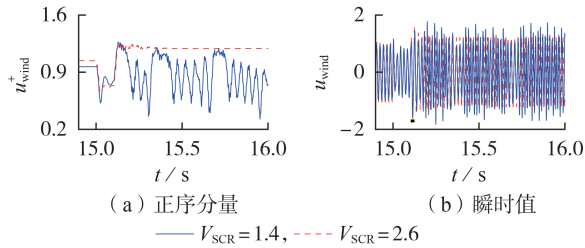


图4 单相瞬时性故障下的机端电压正序分量与瞬时值
Fig.4 Positive-sequence component of generator voltage and instantaneous generator voltage under single-phase transient fault

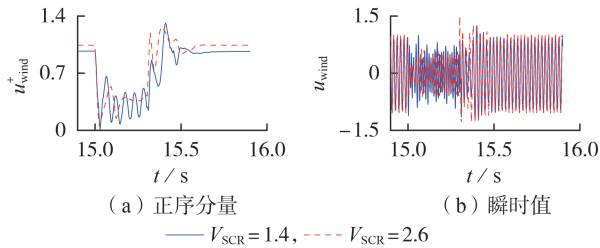


图5 三相故障下的机端电压正序分量与瞬时值
Fig.5 Positive-sequence component of generator voltage and instantaneous generator voltage under three-phase fault

表1 机端电压正序分量峰值

Table 1 Peak value of positive-sequence component of generator voltage

机型 代码	机端电压正序分量峰值			
	单相瞬时性故障		三相故障	
	$V_{SCR}=1.4$	$V_{SCR}=2.6$	$V_{SCR}=1.4$	$V_{SCR}=2.6$
HZRF	脱网(1.32)	1.22	1.30	1.25
ZCYG	1.30	1.15	1.22	1.20
JF	脱网(1.51)	脱网(1.51)	1.18	1.17
MYRN	脱网(1.6)	1.45	脱网(1.28)	1.19
YJ	脱网(1.52)	脱网(1.11)	1.16	1.10
ZCZC	脱网(1.29)	1.25	脱网(1.22)	1.21
SQHW	脱网(1.56)	脱网(1.21)	脱网(1.40)	脱网(1.21)
GMS	脱网(1.48)	脱网(1.35)	1.24	脱网(1.12)
平均值	1.45	1.28	1.25	1.18

表2 机端电压瞬时值峰值

Table 2 Peak value of instantaneous generator voltage

机型 代码	机端电压瞬时值峰值			
	单相瞬时性故障		三相故障	
	$V_{SCR}=1.4$	$V_{SCR}=2.6$	$V_{SCR}=1.4$	$V_{SCR}=2.6$
HZRF	脱网(1.72)	1.71	1.50	1.32
ZCYG	1.47	1.22	1.50	1.42
JF	脱网(2.80)	脱网(2.92)	1.41	1.46
MYRN	脱网(2.53)	2.30	脱网(1.59)	1.53
YJ	脱网(1.82)	脱网(1.44)	1.29	1.14
ZCZC	脱网(1.49)	1.23	脱网(1.51)	1.34
SQHW	脱网(1.71)	脱网(1.31)	脱网(1.51)	脱网(1.21)
GMS	脱网(2.01)	脱网(1.49)	1.61	脱网(1.11)
平均值	1.94	1.70	1.49	1.32

电压正序分量峰值和瞬时值峰值表征风电机组暂态过电压水平的原因在于:风电机组配电回路上的电

源、继电器等器件的安全性受工频过电压水平限制,风电机组的IGBT对瞬时电压峰值较为敏感。表1、2中的“脱网”状态说明,风电机组在对应故障和SCR条件下会保护动作脱网(基于DLL的风电机组模型包含实际保护策略),表中“脱网”状态括号内的数值为风电机组脱网前的过电压峰值,且表中数值均为标么值。

CSCR一般取1.5~2.5^[11-21],SCR小于CSCR时系统失稳,反之稳定。设计 $V_{SCR}=1.4$ (小于一般的CSCR取值)和 $V_{SCR}=2.6$ (大于一般的CSCR取值)2种工况,若 $V_{SCR}=1.4$ 时系统失稳且 $V_{SCR}=2.6$ 时系统稳定,则可一定程度地佐证:CSCR指标可用于评估风电机组并网系统典型短路故障下的风电机组脱网风险。根据表1、2可知,75%的机型不满足“ $V_{SCR}=1.4$ 时系统失稳且 $V_{SCR}=2.6$ 时系统稳定”的条件,这说明CSCR难以定量评估短路故障过程中风电机组的脱网风险。造成CSCR难以定量评估故障脱网风险的原因在于:不同风电机组机型在短路过程中的响应特性和保护动作判据差别较大,采用不考虑风电机组响应的SCR相关指标难以定量判断不同机型的风电机组脱网的风险。另外,根据表1、2可知,50%的机型不满足“ $V_{SCR}=2.6$ 时系统稳定”的条件,这说明用CSCR确定的送出极限偏乐观,难以为计算风电汇集系统受暂态过电压约束的送出极限提供参考。

进一步地,根据表1、2,对比 $V_{SCR}=1.4$ 和 $V_{SCR}=2.6$ 这2种工况的过电压水平,可以发现除了机型JF以外,其他机型在 $V_{SCR}=2.6$ 时的暂态过电压水平小于 $V_{SCR}=1.4$ 时的情况。根据8种机型的风电机组的电压平均值, V_{SCR} 从1.4升至2.6后,8种机型的风电机组在单相瞬时性故障下,机端电压正序分量峰值的平均值降低了0.17 p.u.,电压瞬时值的平均值降低了0.24 p.u.,在三相故障下的机端电压正序分量峰值的平均值降低了0.07 p.u.,电压瞬时值的平均值降低了0.17 p.u.。可以看出,若应用SCR指标规范新能源并网点的系统强度,则对抑制故障过程的暂态过电压水平有一定参考价值。同时,对比8种机型的风电机组在单相瞬时性故障和三相故障下的过电压结果可知,在 $V_{SCR}=1.4$ 的条件下,所有机型的风电机组在单相瞬时性故障下的机端电压正序分量峰值都高于三相故障,6种机型的风电机组在单相瞬时性故障下的电压瞬时值峰值高于三相故障,这表明所测试的大部分机型,在低SCR条件下发生单相瞬时性故障导致的暂态过电压比三相故障更严重。

3 SCR评估次/超同步振荡风险

通过归纳关于采用SCR指标评估风电汇集系统振荡风险的现有研究可知^[20-21],利用SCR判断风电机组并网系统振荡风险时,需考虑风电机组特性。

风电汇集系统包含多个特性不同的风电机组,对于不同的风电机组,根据振荡(小干扰失稳)风险计算得到的CSCR可能不同,难以用某个统一的CSCR数值保证不同机型的风电机组接入后均不存在振荡失稳风险。故有必要针对不同机型的风电机组,开展SCR指标对振荡风险的影响规律分析。

针对上述问题,采用控制硬件在环CHIL(Control-Hardware-In-Loop)实时仿真方法,基于CHIL扰动注入阻抗测量法进行风电机组阻抗测量,根据风电机组阻抗的幅频相频特性与系统阻抗(由传统SCR定义表征),可计算相角裕度进而判断系统振荡风险。以表1中的风电机组机型HZRF为例,基于CHIL实时仿真实验平台,得到 $V_{SCR}=1.4$ 和 $V_{SCR}=2.6$ 条件下,风电机组阻抗 Z_{wind} 与系统阻抗 Z_{sys} 的Bode图如图6所示。由图可知:在 $V_{SCR}=1.4$ 时,风电机组阻抗与电网阻抗幅值在36 Hz左右相交,对应的相角差为 239° ,表明系统在36 Hz左右频段存在振荡风险;在 $V_{SCR}=2.6$ 时,风电机组阻抗与电网阻抗幅值在32 Hz左右相交,系统存在振荡风险。

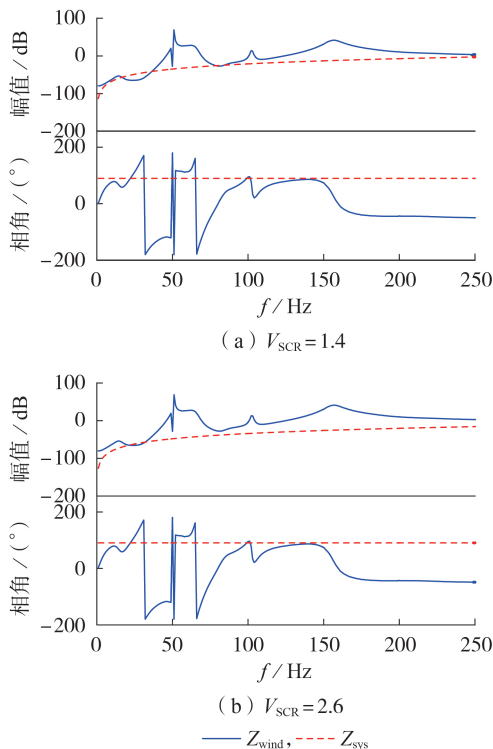


图6 风电机组的阻抗特性Bode图

Fig.6 Bode diagram of impedance characteristic for wind turbine

利用上述方法给出表1中8种机型的风电机组在 $V_{SCR}=1.4$ 和 $V_{SCR}=2.6$ 条件下的振荡情况,得到不同SCR下的相角裕度如表3所示。若相角裕度小于 0° 则系统失稳,若相角裕度大于 0° 则在表中给出具体数值,表中括号内的数值为主导振荡模态频率。

若所有机型的风电机组在 $V_{SCR}=1.4$ 时系统失稳,

表3 不同SCR下的相角裕度

Table 3 Phase margin under different values of SCR

机型代码	相角裕度	
	$V_{SCR}=1.4$	$V_{SCR}=2.6$
HZRF	失稳(36 Hz)	失稳(32 Hz)
ZCYG	失稳(41 Hz)	42.9° (7 Hz)
JF	失稳(114 Hz)	29.5° (174 Hz)
MYRN	9.4° (132 Hz)	14.7° (115 Hz)
YJ	6.1° (26 Hz)	30.1° (5 Hz)
ZCZC	87.2° (69 Hz)	104.8° (71 Hz)
SQHW	24.6° (102 Hz)	31.3° (144 Hz)
GMS	失稳(28 Hz)	失稳(18 Hz)

在 $V_{SCR}=2.6$ 时系统稳定,则可一定程度佐证:CSCR能够定量评估风电机组汇集系统振荡风险。但根据表3可知,75%的机型不满足“ $V_{SCR}=1.4$ 时失稳且 $V_{SCR}=2.6$ 时稳定”的条件,这说明CSCR难以定量评估风电机组并网振荡风险。另外,根据表3可知,25%的机型不满足“ $V_{SCR}=2.6$ 时系统稳定”的条件,这说明用CSCR确定的送出极限不够保守,难以为计算风电汇集系统受次/超同步振荡约束的送出极限提供参考。

进一步地,根据表3可知,对于8种机型的风电机组,均符合如下规律:若高SCR下系统失稳,则低SCR下系统肯定失稳,若低SCR下系统失稳,高SCR下系统不一定失稳。这说明若应用SCR指标规范风电机组并网点系统强度,可一定程度上规避风电机组振荡风险。

4 结论

在工程中应用的SCR指标一般仅计及电网网络特性信息,不考虑风电机组控制特性。但风电汇集系统的静态电压稳定、暂态过电压以及次/超同步振荡问题都不同程度地与风电机组控制特性相关,使用SCR指标判断稳定性问题时,可能存在一定误差。本文针对上述问题,基于主流风电机组厂家实物控制器开展研究,分析了应用SCR评估风电汇集系统静态电压稳定、暂态过电压和次/超同步振荡三方面稳定问题的适用性,得到主要结论如下。

1)静态电压稳定方面:在已知风电机组特性的条件下,SCR指标与系统静态电压稳定性在数学上有严格对应关系,提升系统SCR可有助于改善静态电压稳定性,可应用CSCR为确定系统受静态电压稳定性约束的送出极限提供参考。但如果不考虑风电机组无功特性,则应用CSCR指标难以准确评估系统的静态电压稳定性。

2)暂态过电压方面:由于不同机型的风电机组在短路故障过程中的响应特性和保护动作判据差别较大,采用不考虑风电机组响应的SCR相关指标难以定量判断风电汇集系统由于暂态过电压问题导致的风电机组脱网风险。但实验结果表明,提升SCR

指标后,大多数风电机组的暂态过电压水平有所下降,这说明应用SCR指标规范风电并网点系统强度,对抑制故障过程中的暂态过电压水平有参考价值。

3)次/超同步振荡方面:应用SCR指标难以定量评估风电汇集系统发生次/超同步振荡的风险,难以为计算风电汇集系统受次/超同步振荡约束的送出极限提供参考。但实验结果表明,提升系统SCR指标,可在一定程度上规避系统发生振荡的风险。

受实际电力系统复杂条件所限,目前应用SCR指标还较难准确评估风电汇集系统的各类稳定性。为了能让SCR指标在系统运行阶段为运行方式设计人员和调度运行人员提供更多帮助,在计算风电汇集系统送出极限的过程中发挥更重要的作用,提出以下2个方面的建议。

1)统计不同风电机组特性:统计不同风电机组在不同SCR条件下的暂态过电压特性/宽频振荡特性,梳理暂态过电压约束或宽频振荡约束下不同风电机组的CSCR数据是提出普适性SCR计算方法和合理的CSCR的前提。

2)风电机组特性的规范化:SCR指标常被应用于评估直流馈入系统的静态电压稳定,能够在直流系统广泛应用的一个重要原因在于直流换流站制造厂家较少,不同换流站的响应特性差异性较小,而风电机组厂家相对较多,不同风电机组应用的控制策略差异较大,导致风电汇集系统中常含有多种特性不同的风电机组,使得采用某一固定的CSCR数值难以准确评估不同特性风电机组接入后的系统稳定性。故而有必要根据实际风电汇集系统的SCR数值,提出有针对性的风电机组动态特性指标要求,从而对接入该系统中不同厂家的风电机组进行规范化管理。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李昂洋,晁璞璞,徐式蕴,等. 风电经特高压直流送出系统的暂态过电压问题研究综述[J]. 电力自动化设备,2022,42(3): 26-35.
LI Boyang, CHAO Pupu, XU Shiyun, et al. Review on transient overvoltage issues of wind power transmission system via UHVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 26-35.
- [2] 刘振亚,张启平,董存,等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 1-10.
- [3] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-27.
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-27.
- [4] 许晓菲,牟涛,贾琳,等. 大规模风电汇集系统静态电压稳定实用判据与控制[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):15-19,33.
XU Xiaofei, MU Tao, JIA Lin, et al. Practical criteria of static voltage stability in power systems with high wind penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 15-19, 33.
- [5] 汪宁渤,马明,强同波,等. 高比例新能源电力系统的发展机遇、挑战及对策[J]. 中国电力,2018,51(1):29-35,50.
WANG Ningbo, MA Ming, QIANG Tongbo, et al. High-penetration new energy power system development: challenges, opportunities and countermeasures[J]. Electric Power, 2018, 51(1): 29-35, 50.
- [6] 谢小荣,刘华坤,贺静波,等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(12): 26-32.
XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 26-32.
- [7] 孙华东,张振宇,林伟芳,等. 2011年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术,2012,36(10):76-80.
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis on serious wind turbine generators tripping accident in Northwest China Power Grid in 2011 and its lessons[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [8] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化,2021,45(22): 1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [9] WU D, LI G, JAVADI M, et al. Assessing impact of renewable energy integration on system strength using site-dependent short circuit ratio[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1072-1080.
- [10] 牛拴保,柯贤波,任冲,等. 基于短路容量量化评估的大规模新能源直流送端电网运行方式优化方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 123-129.
NIU Shuanbao, KE Xianbo, REN Chong, et al. Optimal method of operation modes for large-scale new energy DC sending-end power grid based on short circuit capacity quantitative assessment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 123-129.
- [11] 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.
- [12] AIK D L H, ANDERSSON G. Use of participation factors in modal voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 203-211.
- [13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 国家标准出版社, 2019.
- [14] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 《电力系统安全稳定导则》《电力系统技术导则》条文释义与学习辅导[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [15] Australian Energy Market Operator. Recommended technical standards for generator licensing in South Australia[EB/OL]. [2021-11-25]. <http://www.escosa.sa.gov.au/Article-Documents/>

- 1048 / 20170331-Inquiry-Recommended-TechnicalStandardsGeneratorLicensingSA-AEMOadvice.pdf.aspxEmbed=Y, 2017-3-31.
- [16] 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 system part 1: HVDC transmission capability[J]. Power System Technology, 1997, 21(1): 12-16.
- [17] 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.
- [18] 孙华东, 徐式蕴, 许涛, 等. 新能源多场站短路比定义及指标[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 497-506.
SUN Huadong, XU Shiyun, XU Tao, et al. Definition and index of short circuit ratio for multiple renewable energy stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 497-506.
- [19] 孙大卫, 吴林林, 刘辉, 等. 弱电网直驱风机低电压穿越特性及其对机端暂态电压的影响[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4377-4386.
SUN Dawei, WU Linlin, LIU Hui, et al. The effect of low voltage ride through characteristics on PMSG terminal transient voltage in weakly-synchronized grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4377-4386.
- [20] 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.
- [21] 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): 5516-5527.
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): 5516-5527.
- [22] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 23-31.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Minhui, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 23-31.
- [23] 张兴, 孙艳霞, 李丽娜, 等. 风电机组电磁暂态建模及验证[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 106-112.
ZHANG Xing, SUN Yanxia, LI Lina, et al. Electromagnetic transient modelling and verifying of wind turbine generator[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 106-112.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程: GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [25] 国家能源局. 风电机组电气仿真模型建模导则: NB/T 31066—2015[S]. 北京: 中国电力科学研究院, 2015.

作者简介:



吴林林

吴林林(1986—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为新能源并网技术(E-mail: wu.linlin@jibei.sgcc.com.cn);

孙大卫(1990—), 男, 工程师, 硕士, 通信作者, 主要研究方向为新能源并网技术(E-mail: dddd129216713@126.com)。

(编辑 李玮)

Stability analysis of dense wind power area based on short circuit ratio index

WU Linlin, LI Yunhong, YU Siqi, SUN Yamin, WANG Xiao, YANG Yanchen,

DENG Xiaoyang, SU Tianyu, SUN Dawei

(State Grid Wind-Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Power Generation Technology Laboratory,

State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China)

Abstract: SCR (Short Circuit Ratio) is an index to describe the “system strength”. Currently, the power system operation department is exploring how to use SCR index to evaluate the stability of dense wind power area. To explore the value of SCR in engineering evaluation process of dense wind power area stability, and analyze the suitable range and condition of SCR index, the studies are carried out based on the physical controllers made by wind turbine manufacturers with the highest market share. Considering the actual wind turbine characteristics, the feasibility of evaluating stability of dense wind power area by SCR index is analyzed from three aspects of static voltage stability, transient overvoltage and sub-/super-synchronous oscillation. It is found that increasing SCR index of system can improve the above three types of stability problem from different degrees. Moreover, if the differences of wind turbine characteristics are not considered in the evaluation process, the SCR index cannot accurately reflect the system stability margin of the above three types of problems.

Key words: wind power; short circuit ratio; static voltage stability; transient overvoltage; wideband oscillation; fault ride-through

附录 A

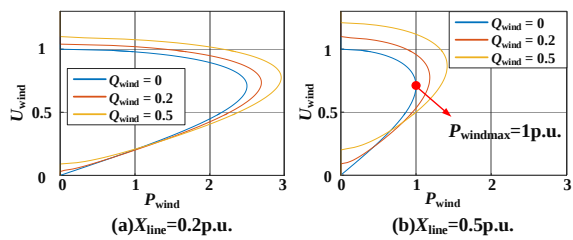


图 A1 不同 SCR 下的 PV 曲线
Fig.A1 PV curves with different values of SCR

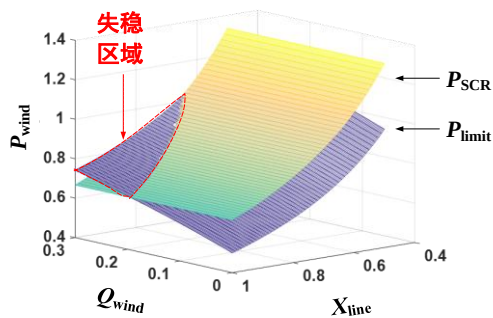


图 A2 静态电压稳定约束下的送出极限
Fig.A2 Power limit under static voltage stability constraint

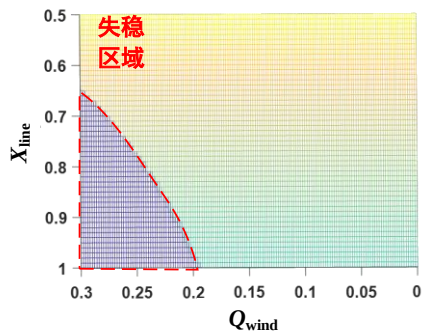


图 A3 CSCR 失效范围
Fig.A3 Scope of failure CSCR