

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.013

高比例新能源电网新能源功率优化分配方法

任冲¹, 柯贤波¹, 王吉利¹, 王国春¹, 赵荣臻²

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:大规模新能源接入弱交流电网时易发生暂态过电压、锁相同步稳定等问题,为新能源充分利用带来挑战。对此,文中探究了新能源接入系统稳定水平的影响因素,将新能源短路比作为系统电压强度的量化评估依据,推导出短路比对新源发电功率的灵敏度,综合考虑系统平均短路比和最低点短路比灵敏度,构建新能源短路比综合灵敏度指标,提出一种基于等综合灵敏度准则的新能源发电功率优化分配方法。利用该方法对新能源发电功率进行优化控制,在确保系统安全稳定基础上充分利用可再生能源,最后以西北某新能源集中送出系统为算例进行分析,验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:系统强度;新能源短路比;综合灵敏度指标;暂态过电压;等综合灵敏度;新能源优化分配

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0110-08

0 引言

受资源分布限制,风光资源大多远离负荷和常规电源地区,大规模新能源并入交流电网末端。在上述电网末端,电网强度与新能源接入量相比较弱,且新能源机组通过电力电子设备并入电网,无法对电网提供电压、频率支撑,新能源发电功率大幅增加后,设备与设备之间、设备与电网之间耦合明显,容易因电网强度下降产生暂态过电压^[1-2]、宽频带振荡^[3-4]等系统稳定问题。随着双碳目标的提出,沙漠、戈壁、荒漠新能源发展进一步提速,新能源接入的电网强度将呈进一步下降趋势,引发的相关稳定问题逐渐成为影响新能源发展的主要因素。

针对上述问题,国内外学者针对新能源发电功率对电网稳定性、高比例新能源接入系统方案优化等方面开展了大量研究。稳定性方面主要针对新能源对系统静态稳定、暂态稳定水平影响开展分析,文献[5-6]考虑电压越限等静态稳定问题,定量计算各机组出力对电压上升的灵敏度,确定发电功率极限;文献[6]考虑了新能源对系统暂态稳定水平的影响;文献[7]通过特征值阻尼比分析,研究了双馈风电场接入规模对小干扰稳定性的影响。经济性方面主要针对发电费用、环保效益、网损等指标开展研究,文献[8]以系统网损最小为目标,提出新能源接入系统优化方案;文献[9]考虑电力市场影响,研究新能源发电的环保和社会效益并提出

了环境系数,可用于指导大规模新能源接入规划。可靠性方面主要考虑新能源对供电可靠性、调峰能力、保护设备等的影 响,文献[10-12]从电网的调峰平衡角度出发,对新能源极限渗透率进行优化求解;文献[13]研究了不同新能源发电功率对系统继电保护设备可靠动作的影响,进而计算系统新能源发电最大渗透率。

综上,目前多数研究仅分析新能源接入对电网单项特性的影响,针对新能源对电网综合稳定性影响的分析不够充分。系统短路容量对平抑电压波动、提升抗扰动能力具有重要意义^[14-16],能够综合反映新能源接入系统的电压强度,同时代表着新能源接入系统的抗扰动能力。在网架结构设备参数不变的情况下,高比例新能源接入弱系统稳定问题突出的本质原因就是近区无功支撑即短路容量不足^[17-19],同时,新能源场站在故障进入高、低穿期间将吞吐大量无功,在考虑短路容量需求时须考虑新能源场站间相互影响。文献[14]提出新能源多场站短路比(multiple renewable energy station short circuit ratio, MRSCR)指标,考虑了短路容量、新能源发电功率及新能源场站间的相互影响,评价新能源多场站接入交流系统后的系统强度,能够反映高比例新能源电网稳定性。

为此,文中提出一种基于等灵敏度准则的新能源发电功率优化分配方法,构建了短路比(short circuit ratio, SCR)综合灵敏度指标,该指标既考虑了新能源场站增加功率后对系统平均稳定水平的影响,又考虑了对系统中稳定水平最低的新能源场站的影响。基于该指标利用等灵敏度准则对新能源

收稿日期:2021-12-19;修回日期:2022-02-23

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“新能源场群集中式频率校正控制关键技术研究”(5100-202036013A-0-0-00)

发电功率进行优化控制,能够在确保安全稳定的基础上充分利用可再生能源,最后以西北某新能源集中送出系统为算例进行分析,验证了该方法的可行性和有效性。

1 高比例新能源集中接入系统特性

1.1 高比例新能源集中接入系统存在的稳定问题

在新能源装机规模与交流系统强度不匹配、新能源接入弱交流系统的条件下,新能源无功电压支撑能力较弱,相对短路容量和抗故障扰动能力低,新能源和交流系统相互作用导致系统存在暂态过电压、锁相同步等多种稳定问题^[20-24]。而交直流故障后新能源机端暂态过电压问题尤为突出,新能源逆变器及设备耐受能力差,暂态电压水平易超出新能源设备耐受范围,引起大规模连锁脱网。在图1所示大规模新能源直流送出系统中,若发生直流大功率故障,则直流系统和新能源机组有功大幅波动,直流和新能源均向系统交换大量无功功率,具体如图2所示,导致送端近区电压波动幅度大、变化快,存在新能源机组大规模无序脱网风险^[25]。

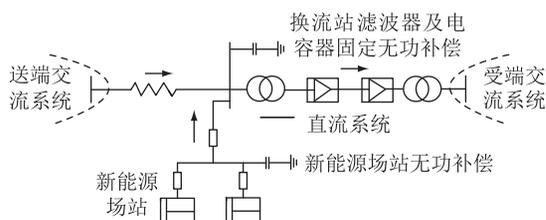


图1 大规模风电直流送出系统示意

Fig. Schematic diagram of large-scale wind power DC sending system

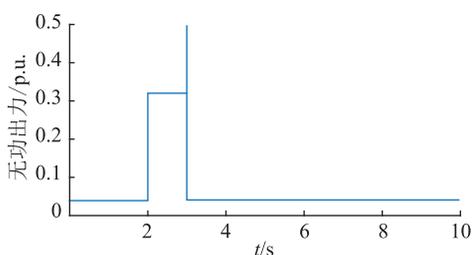


图2 直驱风电机组进入低穿期间无功出力

Fig.2 Reactive power output during low voltage through of direct-drive wind turbines

新能源机组需要通过锁相环技术对系统电压进行跟踪^[15-16],实现非同步能量向同步能量的转换。交流系统相对强度较低时,新能源输出电流与端口电压间的交互作用加大,易引发锁相同步稳定问题,导致新能源振荡脱网^[19-20]。

1.2 基于MRSCR的稳定评估方法

系统中某节点的短路容量为该点三相短路电

流与额定电压乘积,反映了系统电压强度。短路容量与电气设备(包括电力电子设备)容量的比值即为SCR,SCR能直观简单地反映电气设备接入系统的稳定性水平^[26-29]。短路容量对于平抑电压波动、降低暂态过电压水平具有重要意义,在故障冲击、网架结构设备参数不变的情况下,暂态过电压水平与短路容量呈负相关。

以青海海南高比例新能源接入基地为例,该地区新能源接入量大,近区无常规电源支撑,短路容量较低,新能源暂态压升问题严重。在增开常规电源增加系统短路容量后,新能源场站暂态过电压水平有效降低,如图3所示。

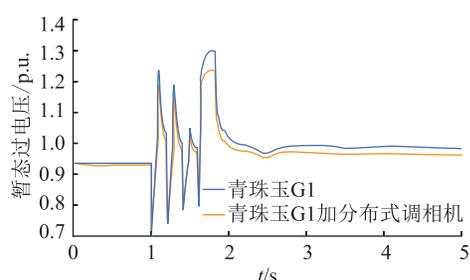


图3 系统短路容量与暂态过电压关系

Fig.3 Relationship between short circuit capacity of the system and transient overvoltage

SCR分析作为一种静态分析方法,以其简单性、直观性,为电气设备容量选取以及电网规划运行提供了重要的参考依据。文献[15]进一步提出MRSCR指标,更适用于评估新能源接入系统稳定性,其计算如式(1)所示。

$$V_{MRSCRi} = \frac{S_{aci}}{P_{REi} + \sum Z_{ij} P_{REj}} \quad (1)$$

$$Z_{ij} = \left| \frac{Z_{eqj} U_i}{Z_{eqi} U_j} \right| \quad (2)$$

式中: S_{aci} , P_{REi} 分别为新能源场站 i 电网侧接入点/场站并网点三相短路容量和注入的有功功率; Z_{ij} 为新能源场站 i 并网母线和新能源场站 j 并网母线之间的功率折算因子,反映了各新能源发电设备电网侧接入点/新能源场站并网点等值阻抗的幅值差异; Z_{eqj} 为新能源场站 j 对新能源场站 i 的互阻抗; Z_{eqi} 为新能源场站 i 的自阻抗; U_i , U_j 分别为新能源场站 i 和 j 的并网母线电压。MRSCR考虑了新能源场站间的相互影响,计及新能源发电设备无功的影响,由式(1)可以看出,MRSCR水平与新能源并网点电网强度及近区新能源发电功率密切相关。新能源单机接入无穷大系统时,通过增加接入等值阻抗,调整新能源SCR,统计发生故障时暂态过电压与SCR之间的关系,可得出SCR与暂态过电压关系

如图4所示。可以看出,新能源发电设备电网侧接入点处 SCR 越大,过电压水平越低。在单机无穷大系统中,利用电磁暂态仿真工具可以看出,当 SCR 为 1.5 时还易导致宽频振荡,如图 5 所示。

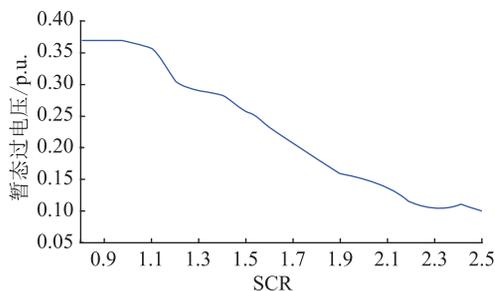


图4 系统 SCR 与暂态过电压关系

Fig.4 Relationship between SCR of the system and transient overvoltage

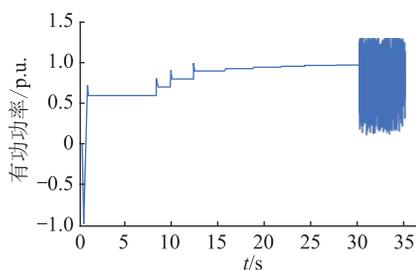


图5 低 SCR 下的宽频振荡

Fig.5 Broadband oscillation under low SCR

由于低 SCR 情况下的新能源稳定问题,相关标准对高比例新能源接入系统强度水平进行了规定,2019 版《电力系统安全稳定导则》及澳大利亚相关标准都对 SCR 提出相应要求。通过对实际新能源在各类工况和扰动下的大量仿真分析得知,当 MRSCR 大于 1.5 时,新能源暂态过电压及锁相同步满足要求,因此 MRSCR 可作为新能源接入系统强度评估依据^[15]。

2 基于接入系统强度量化评估的新能源优化方案

2.1 新能源发电功率对 SCR 灵敏度分析

对于大规模新能源集中接入系统,新能源机组不同并网点和不同并网容量都将影响系统 MRSCR。当系统中出现 SCR 不满足要求的新能源场站时,会导致暂态过电压水平过高,新能源无序连锁脱网等问题,因此须保证系统内所有 MRSCR 都满足要求。

以 2 个新能源场站为例,新能源场站的稳定水平特性分别为 $V_{MRSCR1} = M_1(P_{RE1}, P_{RE2})$, $V_{MRSCR2} = M_2(P_{RE1}, P_{RE2})$, 新能源发电功率为 $P_{df} = P_{RE1} + P_{RE2}$, 其中 M_1, M_2 分别为第 1 个和第 2 个新能源场站有功功率变化下的系统 SCR。新能源场站出力优化问

题可以描述为求解合适的新能源场站发电方案,使得 2 个新能源场站稳定水平更高且最低 MRSCR 满足要求,即 $\max(P_{RE1} + P_{RE2})$, 且 $\min(M_1, M_2) > M_{ref}$, M_{ref} 为系统 SCR 参考值。利用拉格朗日乘法求解,不受约束的目标函数如式(3)所示,其中 λ 为拉格朗日乘子。

$$\max L = P_{RE1} + P_{RE2} - \lambda (\min(M_1, M_2) - M_{ref}) \quad (3)$$

最优化分配条件下,需要满足式(4)、式(5)要求:

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_{RE1}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial P_{RE2}} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\partial M_1}{\partial P_{RE1}} - \lambda = \frac{\partial M_2}{\partial P_{RE2}} - \lambda = 0 \quad (5)$$

由式(5)可知,在各新能源场站的发电功率对 SCR 灵敏度均相等时,为各新能源机组发电功率最优分配状态,将该最优性条件称为基于 SCR 最优分配原则。此外,若某新能源机组发电功率达到上限,即达到装机容量或理论最大可发功率值,则将该新能源机组并网容量设定为上限值,其他新能源机组仍应满足最优 SCR 分配原则。综上,地区新能源发电功率上限仅取决于该地区电网结构,在该地区电网强度不能满足所有新能源机组同时满发时,利用该方法可以找出满足电网稳定水平要求的最优分配方案。

同理,在包括多新能源场站的高比例新能源集中系统中,为保证系统内所有 MRSCR 均满足要求,首先需要计算各新能源机组发电功率对不同新能源场站 SCR 的灵敏度,如式(6)所示。

$$\frac{\partial M_i}{\partial P_{REj}} = \begin{cases} -\frac{S_{aci}}{\left(P_{REi} + \sum Z_{ij} P_{REj}\right)^2} & j = i \\ -\frac{S_{aci} Z_{ij}}{\left(P_{REi} + \sum Z_{ij} P_{REj}\right)^2} & j \neq i \end{cases} \quad (6)$$

为在确保安全稳定的基础上充分利用新能源,提出利用新能源 SCR 综合灵敏度指标,表征电网稳定水平与新能源发电功率之间的量化关系。该指标计算如式(7)所示。

$$D_{c,i} = \alpha D_{sys,i} + \beta D_{M_{min},i} \quad (7)$$

其中:

$$D_{\text{sys},i} = \sqrt{\left(\frac{\partial M_1}{\partial P_{\text{RE}i}}\right)^2 + \left(\frac{\partial M_2}{\partial P_{\text{RE}i}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial M_n}{\partial P_{\text{RE}i}}\right)^2} \quad (8)$$

式中: $D_{c,i}$ 为新能源场站 i 的综合灵敏度; $D_{\text{sys},i}$ 为系统所有场站 SCR 对于新能源场站 i 功率的平均灵敏度; $D_{M_{\min},i}$ 为最低新能源场站 SCR 对第 i 个新能源场站的灵敏度; α, β 分别为系统平均灵敏度以及最低新能源场站 SCR 灵敏度权重系数。综合灵敏度指标既考虑了新能源场站增加功率后对系统平均稳定水平的影响,又考虑了对系统中稳定水平最低的新能源场站的影响。为避免短板效应,随着新能源功率的增加,稳定水平最低的新能源场站最先失稳,因此稳定水平最低的新能源场站灵敏度权重系数高于平均稳定水平灵敏度。

由式(6)可以看出,在电网结构及常规机组装机容量相对固定的情况下,SCR 对各新能源机组发电功率的灵敏度恒为负值。即该区域任意新能源机组发电功率的增加都会降低系统稳定水平,所以新能源场站功率分配问题可转化为系统最低 SCR 指标下优化问题,如式(9)所示。

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^n P_{\text{RE}i} \\ \text{s.t. } V_{\text{MRSCR}i} > V_{\text{MRSCR,ref}} \\ 0 < P_{\text{RE}i} \leq P_{\text{RE}i,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $V_{\text{MRSCR,ref}}$ 为系统 SCR 最低要求值; $P_{\text{RE}i,\max}$ 为新能源场站 i 最大可发功率,该值为新能源最大装机容量和最大理论可发功率(与当时风速相关)两者取小值。随着新能源场站可发功率的不断变化,系统新能源场站功率最优分配不是一组固定数值,而是随着新能源出力的不断变化不停更新的最优分配状态。

由式(9)可知,基于等 SCR 灵敏度原则的新能源发电功率极限可由迭代方法求出,即各新能源机组发电功率初始值设定为一个较小值,通过逐步增加新能源机组功率至新能源机组达到最大出力值,同时也达到功率最优分配状态。首先增加综合灵敏度绝对值最小的新能源机组发电功率,因为该新能源机组在增加相同容量时对系统稳定性影响程度最小。随着迭代次数增加,该机组功率增大,SCR 综合灵敏度将逐步增大,上一迭代过程中综合灵敏度次小的机组将变为当前迭代过程中 SCR 综合灵敏度最小机组,再增加当前迭代过程中综合灵敏度最低的新能源场站出力,直至 SCR 降至最低限制。通过逐次迭代能得出满足该地区 SCR 要求的新能源极限发电功率,同时按此方法得出的新能源场站

功率分配方案能够满足 SCR 最高和新能源场站出力最大,即新能源场站最优功率分配。

2.2 具体优化方法

基于各新能源场站发电功率的 SCR 灵敏度特性,由式(9)的等 SCR 灵敏度准则得到高比例新能源接入系统最优发电功率优化计算方法,流程见图6,具体步骤如下。

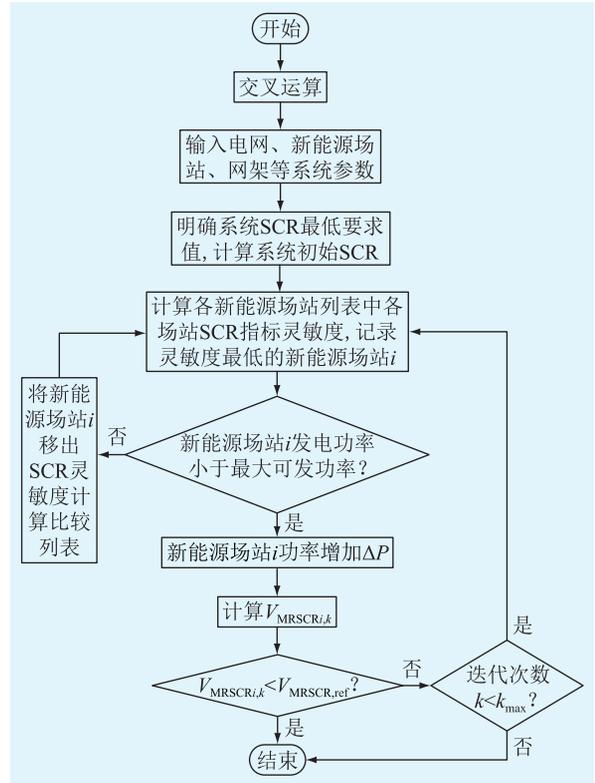


图6 基于等 SCR 灵敏度的发电功率最优分配

Fig.6 Optimal generation power allocation method based on equal SCR sensitivity

步骤 1: 输入新能源机组并网系统参数,如交流电网拓扑结构及相应阻抗数值和新能源场站初始功率;

步骤 2: 根据式(1)计算系统 SCR,并校核各场站 SCR 是否满足最小 SCR 要求;

步骤 3: 根据式(7)计算 SCR 对各新能源机组并网容量的综合灵敏度,比较各综合灵敏度数值,记录综合灵敏度绝对值最小的新能源场站 i ;

步骤 4: 判断新能源场站 i 是否达到其最大可发出力,如已达到最大可发出力,则不再计算该场站 SCR 综合灵敏度;

步骤 5: 第 i 个新能源发电功率增加一个调整步长,记录发电功率和迭代次数;

步骤 6: 根据式(1)计算系统 SCR,记录最小 SCR 与系统要求数值之差 $\Delta V_{\text{MRSCR}} = V_{\text{MRSCR}} - M_{\text{ref}}$;

步骤 7: 将 ΔV_{MRSCR} 与偏差设定值比较,并判断

迭代次数是否达到最大值,若 ΔV_{MRSCR} 小于偏差设定值,或迭代次数达到最大值,执行步骤 8,否则执行步骤 3;

步骤 8:输出新能源场站发电功率分配方案及相应的新能源场站发电极限。

3 等 SCR 灵敏度算例分析

为验证基于等 SCR 灵敏度的新能源场站发电功率最优分配方法的可行性及有效性,以新疆准东地区实际电网为算例,分别对文中方法和等容量分配法进行对比仿真验证。新疆准东电网网架结构如图 7 所示。该地区风资源富集,新能源装机容量达 5.5 GW,大规模新能源从低压 690 V/400 V 逐级升压千余倍接入 750 kV 电网汇集至直流送出,风电与主网电气距离较远,接入点近区无常规能源,短路容量较低,在近区直流发生故障时暂态过电压问题突出。按等容量分配时,在近区风电发电超过 3 GW 时,直流故障后部分风机将出现暂态过电压问题脱网,因此近区风电限额仅为 3 GW,在大风期该地区风电受限严重。

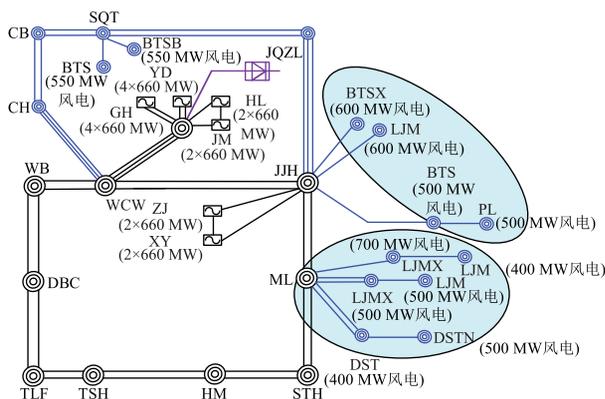


图 7 新疆准东地区实际电网地理图

Fig.7 Geographical map of actual power grid in Zhundong, Xinjiang

表 1 为不同方法进行新能源场站功率分配的方案对比,由表可知,基于等灵敏度方法的新能源并网容量达到 3.54 GW,远高于按装机容量比例分配的新能源并网容量。

图 8 为直流闭锁时机组电压变化曲线,按装机容量比例分配 3 GW 新能源发电功率时,直流故障后新能源汇集站暂态过电压最高为 1.286 p.u.。按等灵敏度准则分配 3 GW 新能源发电功率时,SCR 最低为 1.26 p.u.,相较于按装机容量分配方案,系统稳定水平有一定提升,验证了文中方法的可行性和有效性。按等灵敏度方法以最低 SCR 为目标进行新能源场站功率分配,分配容量为 3.5 GW 时,直流

表 1 新能源场站功率分配方案对比

Table 1 Comparison of power distribution schemes for new energy stations

区域	汇集站	装机容量	按装机容量比例分配	按等 SCR 灵敏度方法分配	按等综合灵敏度方法以最低 SCR 为目标分配
JJH	BTSX	600	350	380	480
	LJM	600	350	380	480
	BTS	500	290	350	460
	PL	500	290	320	460
ML	LJMN	500	290	250	320
	LJMD	500	290	240	270
	LJMX	600	350	320	340
	LJM	500	290	270	250
	DST	500	290	270	280
	DSTN	400	230	220	200
合计		5 200	3 000	3 000	3 540

故障后新能源汇集站暂态过电压也要低于按装机容量比例分配 3 GW 时的暂态过电压,为 1.273 p.u.。由于目前电网新能源机组完成 1.3 p.u. 耐压改造,由图 8 可知,在本次故障下,电压最高点小于 1.3 p.u.,不会引起风电机群连锁脱网,电网可以稳定运行。

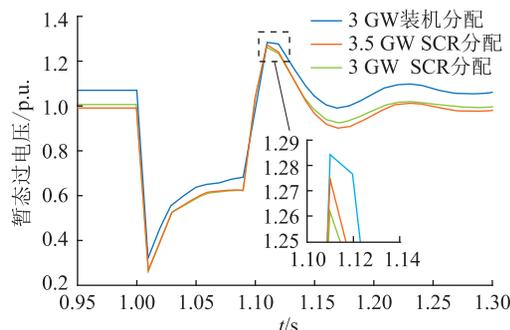


图 8 暂态过电压对比

Fig.8 Transient overvoltage comparison

由于宽频带稳定等问题机理、普适规律尚不明确,在单机系统降低系统短路容量可能出现宽频振荡问题,但在实际电网方式中,受限于新能源装机规模、电网结构、最小开机方式等实际情况,在 SCR 较低时可能不会出现宽频振荡问题。在对新疆准东地区算例进行计算分析时,不同 SCR 下新能源并网方案有功功率波动对比如图 9 所示,可知不同新能源并网方案下,均未出现宽频振荡,均能保持稳定。

图 10 为算例分析过程中 SCR 迭代情况,由图可知,SCR 相同时,基于系统稳定水平量化评估方法比基于传统方法接入的新能源功率更大,能够在确保安全稳定的基础上最大化接入新能源。

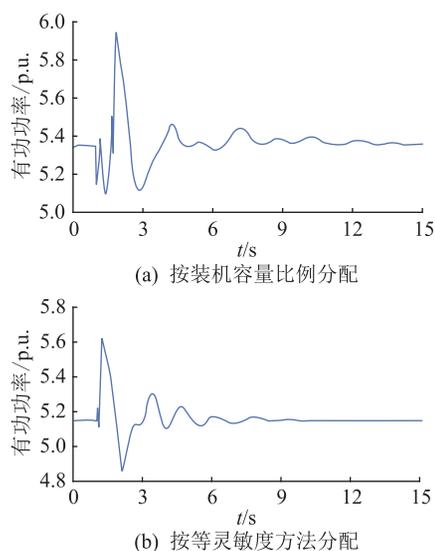


图9 不同新能源并网方案有功波动对比

Fig.9 Comparison of active power fluctuations of different new energy grid-connected schemes

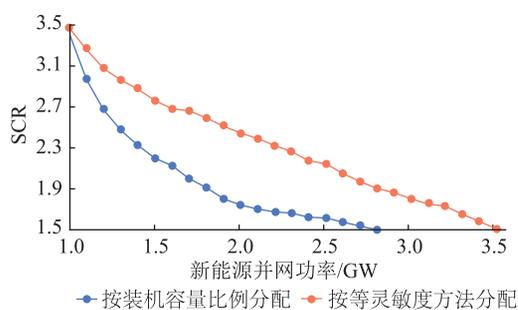


图10 SCR迭代

Fig.10 SCR iteration

4 结语

文中提出一种基于接入系统强度量化评估的新能源优化功率分配方法及极限送出能力分析方法。首先,引入SCR作为电网稳定水平与新能源场站的量化关系评估指标;其次,推导出各新能源场站的综合灵敏度,揭示新能源机组功率变化对系统稳定水平的影响;然后,提出基于等SCR灵敏度的发电功率优化分配方法;最后,通过实际电网系统验证了该方法的可行性和相较于按装机容量分配方法的优越性。文中为高比例新能源接入系统发电优化调度提供了全新思路,有助于更加全面地评估系统发电极限,优化分配方案。

考虑新能源场站发电公平性,下一步将增加考虑不同新能源场站限电率差异性的约束指标,即在确定最优分配方案的同时考虑不同新能源场站的限电率差异应不大于一固定值,以避免出现三公调度问题,但针对SCR差异较大的新能源场站应允许其在限电率方面保留一定差异,以提高其加装小型

调相机提升电网强度的积极性。

参考文献:

- [1] 严干贵,常青云,黄亚峰,等. 弱电网接入下多光伏逆变器并联运行特性分析[J]. 电网技术,2014,38(4):933-940.
YAN Gangui, CHANG Qingyun, HUANG Yafeng, et al. Analysis on parallel operational characteristics of multi photovoltaic inverters connected to weak-structured power system [J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 933-940.
- [2] 蔡蒙蒙. 弱电网情况下光伏并网逆变器的稳定性研究[D]. 天津:天津大学,2014.
CAI Mengmeng. Stability of the photovoltaic grid-connected inverter based on the weak grid situation [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [3] SHEN L, BARNES M, MILANOVIĆ J V, et al. Potential interactions between VSC HVDC and STATCOM [C]//2014 Power Systems Computation Conference. Wrocław, Poland. IEEE, 2014: 1-7.
- [4] 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.
- [5] SHI L J, FA L, SHI J F, et al. Accommodation capacity for wind farm based on the static security constraints in bulk power systems [C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Portland, OR. IEEE, 2018: 1-5.
- [6] AYRES H M, FREITAS W, DE ALMEIDA M C, et al. Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(4): 495.
- [7] MISHRA Y, MISHRA S, LI F X, et al. Small-signal stability analysis of a DFIG-based wind power system under different modes of operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(4): 972-982.
- [8] GÖZEL T, HOCAOĞLU M H. An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems [J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(6): 912-918.
- [9] 袁建党,袁铁江,晁勤,等. 电力市场环境大规模风电并网系统电源规划研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5): 22-26.
YUAN Jiandang, YUAN Tiejia, CHAO Qin, et al. Study of generation expansion planning of the power system incorporating large-scale wind power in the environment of electricity market [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 22-26.
- [10] 杨楠,刘涤尘,孙文涛,等. 基于调峰平衡约束的光伏发电穿透功率极限研究[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(4):1-6.
YANG Nan, LIU Dichen, SUN Wentao, et al. Research about photovoltaic power's penetration limit based on the peak load balance constraint [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 1-6.
- [11] 王瑞欣,赵春雷,陈大军,等. 基于注入功率的网损灵敏度

- 研究[J]. 自动化技术与应用,2020,39(2):9-12.
- WANG Ruixin,ZHAO Chunlei,CHEN Dajun, et al. Research on sensitivity of power loss based on injection power[J]. Techniques of Automation and Applications,2020,39(2):9-12.
- [12] 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):4506-4515,4730.
- 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):4506-4515,4730.
- [13] CHEN J,FAN R,DUAN X, et al. Penetration level optimization for DG considering reliable action of relay protection device constrains[C]// Sustainable Power Generation and Supply,2009,1-5.
- [14] 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.
- [15] 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):3112-3120.
- 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):3112-3120.
- [16] 胡祺,付立军,马凡,等. 弱电网下基于锁相控制并网变换器小扰动同步稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):98-108,401.
- HU Qi,FU Lijun,MA Fan, et al. Small signal synchronizing stability analysis of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(1):98-108,401.
- [17] 任必兴,杜文娟,王海风,等. 锁相环控制对永磁直驱风机并网次同步振荡稳定性的影响:控制参数安全域[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):142-149.
- REN Bixing,DU Wenjuan,WANG Haifeng, et al. Influence of PLL control on sub-synchronous oscillation stability of grid-connected PMSG: control parameter safety region[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):142-149.
- [18] 马宁宁,谢小荣,亢朋朋,等. 高比例风电并网系统次同步振荡的广域监测与分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(1):65-74,398.
- MA Ningning,XIE Xiaorong,KANG Pengpeng, et al. Wide-area monitoring and analysis of subsynchronous oscillation in power systems with high-penetration of wind power[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(1):65-74,398.
- [19] 胡彬,吴超,王珩,等. 薄弱电网下新能源设备并网锁相同步方式综述[J]. 电力自动化设备,2020,40(9):26-34,41.
- HU Bin,WU Chao,NIAN Heng, et al. Overview of phase-locked synchronization methods of renewable energy equipment in weak and distorted grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(9):26-34,41.
- [20] LIU H K,XIE X R,HE J B, et al. Subsynchronous interaction between direct-drive PMSG based wind farms and weak AC networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4708-4720.
- [21] YANG Z F,ZHONG H W,XIA Q, et al. Optimal transmission switching with short-circuit current limitation constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(2):1278-1288.
- [22] 周勤勇,杨冬,刘玉田,等. 多直流馈入电网限制短路电流方案多目标优化[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):140-145,151.
- ZHOU Qinyong,YANG Dong,LIU Yutian, et al. Multi-objective optimization for short-circuit current limitation schemes in multiple DC infeed power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(3):140-145,151.
- [23] 边宏宇,潘晓杰,刘芳冰,等. 多直流馈入背景下的河南电压稳定分析及改善措施研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(21):125-131.
- BIAN Hongyu,PAN Xiaojie,LIU Fangbing, et al. Study on voltage stability analysis and improvement measures for Henan province with a background of multiple DC feeding[J]. Power System Protection and Control,2020,48(21):125-131.
- [24] 边宏宇,徐友平,邵德军,等. 直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(18):164-170.
- BIAN Hongyu,XU Youping,SHAO Dejun, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid[J]. Power System Protection and Control,2020,48(18):164-170.
- [25] 李少岩,任乙沛,顾雪平,等. 基于短路电流约束显式线性建模的输电网结构优化[J]. 电工技术学报,2020,35(15):3292-3302.
- LI Shaoyan,REN Yipei,GU Xueping, et al. Optimization of transmission network structure based on explicit linear modeling of short circuit current constraints[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(15):3292-3302.
- [26] WU D,LI G G,MILAD J, 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.
- [27] 张雪丽,杨洪耕,王杨,等. 考虑线路分布参数的并网系统稳定性分析[J]. 智慧电力,2021,49(4):44-50.
- ZHANG Xueli,YANG Honggeng,WANG Yang, et al. Stability analysis of grid connected system considering line distribution parameters[J]. Smart Power,2021,49(4):44-50.
- [28] 刘轶,张毅明,高昆,等. 基于安全风险概率的双特高压直流馈入网架关键断面通道检修评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(17):57-64.
- LIU Yi,ZHANG Yiming,GAO Kun, et al. Research on a maintenance evaluation method of the key section channel of a

double UHVDC feed in a grid based on safety risk probability [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(17): 57-64.

- [29] 于琳,孙华东,赵兵,等. 新能源并网系统短路比指标分析及临界短路比计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(3):919-929.

YU Lin, SUN Huadong, ZHAO Bing, et al. Short circuit ratio index analysis and critical short circuit ratio calculation of renewable energy grid-connected system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(3):919-929.

作者简介:



任冲

任冲(1984),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力系统安全稳定与控制相关工作(E-mail:119074735@qq.com);

柯贤波(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电力系统安全稳定与控制相关工作;

王吉利(1981),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统安全稳定与控制相关工作。

New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid

REN Chong¹, KE Xianbo¹, WANG Jili¹, WANG Guochun¹, ZHAO Rongzhen²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China;

2. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Large scale new energy access to weak alternating current (AC) power grid is prone to transient overvoltage, phase-locked synchronous stability and other problems, which bring problems for the full use of new energy. In this paper, the influencing factors of the stability level of the new energy access system are explored. The short-circuit ratio index of new energy is used as the quantitative evaluation basis of the system voltage intensity, and the sensitivity of the short-circuit ratio of new energy generation power is derived. The comprehensive sensitivity index of the short-circuit ratio of new energy is constructed by comprehensively considering the sensitivity of the average short-circuit ratio and the lowest short-circuit ratio of the system, and an optimal power allocation control scheme for new energy generation based on equal comprehensive sensitivity criterion is proposed. Based on this method, the optimal control of new energy power generation is carried out, and the full utilization of renewable energy is realized on the basis of ensuring the security and stability of the system. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by taking a new energy centralized transmission system in Northwest China as an example.

Keywords: system strength; short circuit ratio of new energy; comprehensive sensitivity index; transient overvoltage; equal comprehensive sensitivity; optimized distribution of new energy

(编辑 方晶)