

新能源并网系统短路比指标分析及 临界短路比计算方法

于琳, 孙华东*, 赵兵, 徐式蕴, 张健, 李宗翰

(电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Short Circuit Ratio Index Analysis and Critical Short Circuit Ratio Calculation of Renewable Energy Grid-connected System

YU Lin, SUN Huadong*, ZHAO Bing, XU Shiyun, ZHANG Jian, LI Zonghan

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: There is a contradiction between the accuracy and practicability of the short circuit ratio (SCR) for system strength evaluation of renewable energy systems, and numerous construction methods lead to inconsistent values of the critical short circuit ratio (CSCR). This paper analyzed the SCR index and proposed the CSCR calculation method. Firstly, the short circuit capacity of AC system and the equivalent grid-connected capacity of the renewable energy were derived. Secondly, the SCR-S calculated by the capacity was proposed according to the SCR concept, and the SCR-U calculated by the voltage was proposed by the relationship between the SCR and the node voltage. And then, the CSCR was solved according to the maximum transmission power. It was recommended that the CSCR extreme value 2 serve as the basis to divide the system strength. Finally, the simulations verified the accuracy and rationality of the system strength evaluation according to SCR-S, SCR-U and CSCR.

KEY WORDS: short circuit ratio; critical short circuit ratio; renewable energy grid-connected system; system strength; maximum transmission power

摘要: 短路比作为评估新能源并网系统电压支撑强度的重要指标,其准确性与实用性之间存在矛盾,且由于构建方法众多导致临界短路比计算不统一。该文对新能源并网系统的短路比指标进行分析,并提出临界短路比计算方法,实现对系统电压支撑强度的评估。首先,建立新能源并网系统的等效分析模型,依据叠加定理分析新能源接入对节点电压的影响,推导交流系统短路容量以及计及多馈入相互影响的新能

源等效并网容量;进一步,提出两个等价短路比指标:依据短路比的容量比概念,提出基于容量计算的短路比指标 SCR-S,以及通过分析短路比与节点电压之间的关系,提出基于电压计算的短路比指标 SCR-U,通过解析推导 SCR-U 与 SCR-S 完全等价关系,SCR-U 形式及解析表达更加简单。其次,基于最大传输功率提出临界短路比数值的理论算法,进一步求解临界短路比的极值,建议将临界短路比极值 2 作为划分新能源并网系统强弱的标准,当 SCR-U 小于 2 时,系统为弱系统。然后,结合 SCR-U 及临界短路比提出系统电压支撑强度评估方法,当 SCR-U 小于临界短路比时,系统处于 P-V 特性不稳定区域。最后,通过算例验证了采用 SCR-U 及临界短路比极值对电压支撑强度进行评估的准确性与合理性。

关键词: 短路比; 临界短路比; 新能源并网系统; 电压支撑强度; 最大传输功率

0 引言

我国大规模新能源开发集中在西部、北部等地区,风电、光伏机组调压能力低,联于弱电网时极易因电压波动脱网,需要系统提供电压支撑保证安全运行。短路比(short circuit ratio, SCR)是衡量系统电压支撑强度的重要指标^[1-3]。临界短路比(critical short circuit ratio, CSCR)^[4]为系统临界稳定状态对应的短路比。通过比较系统当前短路比与其临界短路比可以判断系统的运行状态,评估系统的电压支撑强度^[5],有助于控制新能源并网带来的影响,对保障新能源并网系统安全稳定运行意义重大。

新能源并网系统中各馈入支路之间电气距离近,适用于单馈入系统的传统短路比指标虽仍能大

基金项目: 国家电网公司科技项目(5100-202055434A-0-0-00)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202055434A-0-0-00)。

致反映电压支撑强度,但由于没有考虑支路之间的相互影响准确性降低^[6-7]。针对新能源并网系统提出的加权短路比^[8]、复合短路比^[9]将多馈入新能源视为整体^[10],通过加权或求和粗略估计各馈入支路间的相互作用,准确性低^[11]。与之相比,可评估各并网点强度的短路比指标有利于识别系统的最薄弱点。CIGRE 类比常规直流多馈入短路比,基于经验定义等值电路短路比(effective short circuit ratio, ESCR)^[2]。文献[12]通过比较新能源并网产生的电压扰动相对于额定电压的大小,定义新能源多场站短路比(multiple renewable energy station short circuit ratio, MRSCR)。文献[13-14]通过模态法将多馈入系统解耦,提出广义短路比(generalized short circuit ratio, GSCR),但模态法计算过程复杂,工程实用性低。短路比指标的准确性与实用性之间存在矛盾。

系统临界稳定时对应的短路比为临界短路比,因短路比指标构建方法多样,临界短路比存在计算不统一的问题^[15-16]。临界广义短路比计算复杂,依据新能源与直流之间的一般性,采用 2 和 3 划分系统强弱^[13]。文献[17]通过静态电压稳定的边界条件提取边界值为 1 的指标,将其定义为场站相关短路比(site-dependent short circuit ratio, SDSCR),相应临界短路比等于 1。文献[18]忽略系统电阻及新能源无功出力,通过灵敏度法求解临界短路比为 $\sqrt{2}$ 。系统静态电压失稳源于潮流超过系统最大传输功率^[19],各种静态电压指标本质上以达到最大传输功率作为电压崩溃的临界点^[20],临界短路比的计算与最大传输功率密切相关。

电压支撑强度这一抽象概念需要依据明确的强弱判断标准得以具象。本文构建准确、实用的短路比指标,以临界短路比为参照点,以系统的短路比为坐标,实现对电压支撑强度的评估。首先,通过建立新能源并网系统等效分析模型推导了交流系统短路容量以及新能源等效并网容量,用于新能源系统短路比指标的推导。其次,构建了两种等价的短路比指标:一是通过系统短路容量与新能源并网容量的比值构建了基于容量计算的短路比指标 SCR-S, SCR-S 是传统单馈入系统中的短路比在新能源多馈入系统中的拓展,提高了短路比评估多馈入系统时的准确性;二是通过分析短路比与节点电压之间的数学关系构建了基于电压计算的短路比指标 SCR-U, SCR-U 与 SCR-S 对系统电压支撑强度的评估效果相同,相比之下 SCR-U 形式更加简

单,可通过电压监测对系统电压支撑强度进行实时评估,实用性高。其次,通过推导系统最大传输功率提出临界短路比的计算方法,进一步求解临界短路比的极值,建议将临界短路比极值 2 作为系统强弱判断标准。然后,综合上述推导的 SCR-U 与临界短路比,提出新能源并网系统电压支撑强度评估方法,通过比较 SCR-U 与临界短路比的大小判断系统的稳定状态,当 SCR-U 小于临界短路比时系统运行于 P-V 特性的不稳定区域。最后,通过仿真验证通过 SCR-U 和临界短路比对系统电压支撑强度进行评估的准确性与有效性。

1 新能源并网系统静态电压分析

当前电网中风电、光伏大多采用电流控制型的电压源换流器,呈现电流源性质,电压取决于外部连接情况^[21]。电压稳定性问题涉及电力系统的动态特性,但对其进行快速近似分析时,基于潮流计算的静态分析方法仍有效^[22]。新能源并网系统的静态电压稳定与稳态下最大传输功率密切相关。

1.1 等效分析模型

新能源的接入可视为在并网点增加了大小等于其并网容量的功率扰动,造成节点电压变化。根据戴维南定理,新能源多馈入系统的结构及等效分析模型如图 1(a)、(b)所示。根据叠加定理,将新能源并网系统视为交流系统与新能源的叠加,如图 1(c)所示。等效前后节点电压特性保持不变。

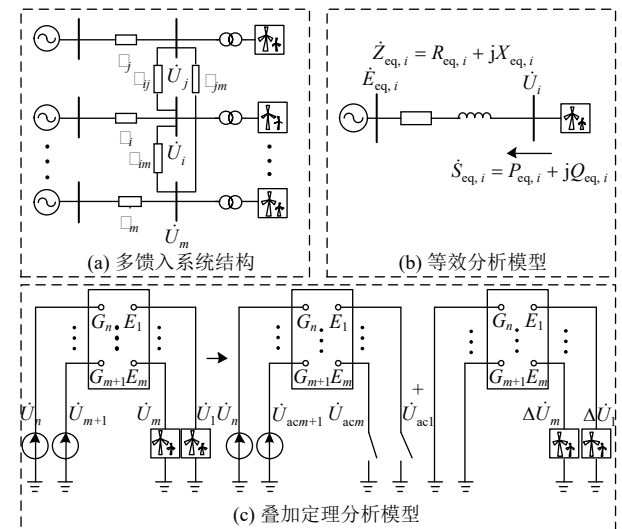


图 1 新能源并网系统分析模型

Fig. 1 Analysis models of renewable energy system

静态电压稳定性分析的实质是求解稳态电路,采用节点阻抗矩阵建立节点电压方程:

$$U = ZI = Z(I_{ac} + I_E) = U_{ac} + \Delta U \quad (1)$$

式中： Z 为节点阻抗矩阵； U 为电压列向量； U_{ac} 为并网前节点电压； ΔU 为新能源并网引起的节点电压变化量； I 为注入电流向量； I_{ac} 为并网前同步机注入电流； I_E 是新能源注入电流。

1.2 交流系统短路容量

1.2.1 短路容量计算

交流系统中，节点 $1\sim m$ 为新能源并网点，节点 $m+1\sim n$ 为同步机节点。节点注入电流由同步机提供，节点电压方程为：

$$U_{ac} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_{ac, m+1} \\ \vdots \\ I_{ac, n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

节点阻抗矩阵中非对角元素 \dot{Z}_{ij} 反映两个节点之间的电气距离；对角元素 \dot{Z}_{ii} 为系统对节点 i 的等值阻抗 $\dot{Z}_{eq, i}$ ：

$$\dot{Z}_{eq, i} = \dot{Z}_{ii} \quad (3)$$

忽略综合负荷，新能源并网前并网点为空载运行，开路电压等于交流系统电势 $\dot{E}_{eq, i}$ ：

$$\dot{U}_{ac, i} = \dot{E}_{eq, i} \quad (4)$$

并网点的短路电流 $\dot{I}_{sc, i}$ 等于该点短路前的开路电压除以系统对该点的等值阻抗：

$$\dot{I}_{sc, i} = \frac{\dot{E}_{eq, i}}{\dot{Z}_{ii}} \quad (5)$$

交流系统向并网点 i 提供的短路容量等于短路电流乘以该点标称电压 U_N ^[22]：

$$\dot{S}_{ac, i} = \frac{U_N \dot{E}_{eq, i}}{\dot{Z}_{ii}} \quad (6)$$

1.2.2 运行电压与开路电压对短路容量的影响

采用不同节点电压进行计算将获得不同的短路容量^[8]，进而影响短路比指标的准确性。求取短路容量时，采用正常情况和故障分量的叠加，如图2所示。 \dot{E} 为交流系统电势； \dot{U} 为故障点电压； \dot{Z}_S 为系统阻抗； \dot{Z}_L 为负荷阻抗。

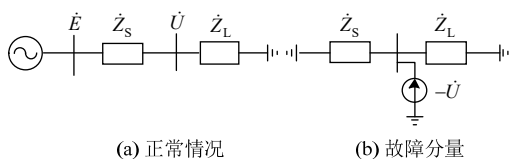


图2 短路容量计算模型

Fig. 2 Short-circuit capacity calculating model

故障前节点运行电压、短路电流分别为：

$$\dot{U} = \frac{\dot{Z}_L}{\dot{Z}_S + \dot{Z}_L} \dot{E} \quad (7)$$

$$\dot{I}_{sc} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}_f} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_S} \quad (8)$$

式中 \dot{Z}_f 为故障网络阻抗， $\dot{Z}_f = \dot{Z}_S // \dot{Z}_L$ 。

采用开路电压进行短路电流计算时，故障前该点空载运行，节点运行电压等于开路电压，负荷阻抗 $\dot{Z}_L = \infty$ ，故障网络阻抗 $\dot{Z}_f = \dot{Z}_S$ ，短路电流的大小等于 E/Z_S ，符合将新能源视为内阻抗为无穷大的电流源的场景。采用运行电压求取短路电流时，运行电压与负荷阻抗关系密切，计算故障网络阻抗时需对新能源内阻抗进行等值。

交流系统短路容量表征交流系统的强度^[22]，短路容量大的节点对扰动功率的抵抗能力强，电压波动小。合理计算交流系统短路容量有利于提高短路比指标的准确性。

1.3 新能源等效并网容量

1.3.1 节点电压变化

新能源并网系统中，并网点 $1\sim m$ 具有外部注入电流，节点电压方程为：

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1m} & \dot{Z}_{1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mm} & \dot{Z}_{mm+1} & \cdots & \dot{Z}_{mn} \\ \dot{Z}_{m+11} & \cdots & \dot{Z}_{m+1m} & \dot{Z}_{m+1m+1} & \cdots & \dot{Z}_{m+1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{n1} & \cdots & \dot{Z}_{nm} & \dot{Z}_{nm+1} & \cdots & \dot{Z}_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{E, 1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{E, m} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

新能源并网点与同步机节点之间的电气距离较远时，对同步机节点的电压扰动较小。分析新能源接入对并网点 $1\sim m$ 的影响时，节点电压方程可降阶，降阶方程与节点 i 电压变化量分别为：

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_i \\ \vdots \\ \Delta \dot{U}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \cdots & \dot{Z}_{1i} & \cdots & \dot{Z}_{1m} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{i1} & \cdots & \dot{Z}_{ii} & \cdots & \dot{Z}_{im} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \dot{Z}_{m1} & \cdots & \dot{Z}_{mi} & \cdots & \dot{Z}_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{E, 1} \\ \vdots \\ \dot{I}_{E, i} \\ \vdots \\ \dot{I}_{E, m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta \dot{U}_i = \dot{Z}_{ii} \dot{I}_{E, i} + \sum_{j \neq i} \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{E, j} \quad (11)$$

1.3.2 等效并网容量计算

并网点 i 新能源等效并网容量 $\dot{S}_{eq, i}$ 为：

$$\dot{S}_{eq, i} = \dot{U}_i \dot{I}_{eq, i}^* = \dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^*}{\dot{Z}_{ii}^*} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_j} \dot{S}_j \quad (12)$$

$$\dot{I}_{\text{eq},i} = \frac{\dot{U}_i - \dot{E}_{\text{eq},i}}{\dot{Z}_{ii}} = \frac{\Delta \dot{U}_i}{\dot{Z}_{ii}} \quad (13)$$

式中: *表示共轭运算; \dot{S}_i 、 \dot{S}_j 是与节点 i 、 j 直接相连的新能源容量; $\dot{I}_{\text{eq},i}$ 为线路电流。

当交流系统结构确定后, 新能源并网容量越大, 对并网点电压的影响越大。新能源等效并网容量包括直连新能源容量及其他馈入支路的新能源容量, 体现多馈入支路之间的相互影响。

2 新能源并网系统短路比指标

合理的新能源并网系统短路比指标具有以下特征: 短路比概念清晰, 物理意义明确, 数学推导严谨; 短路容量表征交流系统时不重复考虑新能源影响; 多馈入系统的短路比反映各馈入支路之间的相互影响, 且与单馈入短路比保持一致。

2.1 基于容量计算的短路比指标

新能源并网系统中, 短路比用以衡量交流系统与新能源的相对强弱^[22]:

$$\text{SCR-T} = \frac{S_{\text{ac}}}{P_{\text{N}}} = \frac{1}{|Z_{\text{pu}}|} \quad (14)$$

式中: P_{N} 是新能源额定容量; Z_{pu} 是系统阻抗标么值。采用 SCR-T 表示传统短路比指标, 以区别于其他短路比指标。

单馈入系统中, 以标称电压为基准电压, 以新能源额定容量为基准容量时, SCR-T 与系统阻抗相关。通过阻抗计算的 SCR-T 在多馈入系统中准确性降低: 各并网点的新能源容量不同, 基准容量难以统一; 新能源对并网点电压的影响不仅源于该点直连新能源, 同时受其他馈入新能源影响; 新能源运行于非额定工况下时, 采用额定容量计算的短路比对电压支撑强度进行评估时将存在偏差。

针对新能源多馈入系统, 依据短路比的概念, 采用交流系统短路容量与新能源等效并网容量的比值提出基于容量计算的短路比指标 SCR-S:

$$\text{SCR-S}_i = \frac{S_{\text{ac},i}}{S_{\text{eq},i}} = \frac{|U_{\text{N}} \dot{E}_{\text{eq},i} / \dot{Z}_{ii}|}{|\dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^* \dot{U}_i}{\dot{Z}_{ii}^* \dot{U}_j} \dot{S}_j|} \quad (15)$$

式中 SCR-S_{*i*} 表示并网点 i 处的电压支撑强度。

SCR-S 的概念与 SCT-T 保持一致, 在单馈入系统中两者相等。SCR-S 评估新能源多馈入系统电压支撑强度时, 可以衡量各个并网点的电压支撑能力。

2.2 基于电压计算的短路比指标

新能源并网点标称电压与新能源并网引起的

电压变化量之比为:

$$\frac{U_{\text{N}}}{|\Delta \dot{U}_i|} = \frac{U_{\text{N}}}{|\dot{Z}_{ii} \dot{I}_{\text{eq},i} + \sum_{j \neq i} \dot{Z}_{ij} \dot{I}_{\text{eq},j}|} \quad (16)$$

对式(16)进行进一步推导, 可得:

$$\frac{|U_{\text{N}} \dot{E}_{\text{eq},i}|}{|\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i|} = \frac{|U_{\text{N}} \dot{E}_{\text{eq},i} / \dot{Z}_{ii}|}{|\dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^* \dot{U}_i}{\dot{Z}_{ii}^* \dot{U}_j} \dot{S}_j|} \quad (17)$$

显然, 该式右边即 SCR-S, 新能源多馈入系统中并网点 i 的短路比可以通过电压进行构建:

$$\text{SCR-U}_i = \frac{|U_{\text{N}} \dot{E}_{\text{eq},i}|}{|\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i|} \quad (18)$$

式中 SCR-U_{*i*} 表示并网点 i 处的电压支撑强度。

针对新能源并网系统, 依据短路比的概念提出了基于容量计算的短路比指标 SCR-S; 进一步, 通过分析短路比与节点电压之间的关系, 提出了基于电压计算的短路比指标 SCR-U。SCR-S 与 SCR-U 对于新能源并网系统电压支撑强度评估的效果相同, 相比较之下, SCR-S 直观体现了短路比的定义, SCR-U 计算形式更加简单, 计算需要的参数可实时获取, 因而可进行实时强度评估。依据 SCR-U 刻画短路比与并网点电压变化量的关系如图 3 所示。系统电压支撑强度越低, 新能源并网引起的电压扰动越大, 短路比越小。

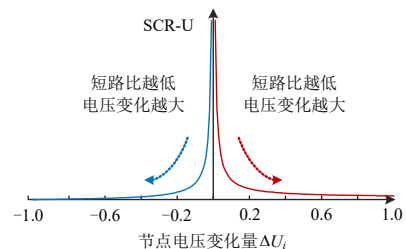


图3 短路比与节点电压变化量之间的关系

Fig. 3 The relation between SCR and voltage change

3 新能源并网系统临界短路比

新能源多馈入系统稳定等价于新能源等效分析模型稳定, 由此实现单馈入系统与多馈入系统的统一。对新能源并网系统的临界短路比进行分析时采用等效分析模型。本章为简便表示省略下标 eq, 但相关变量仍为等效分析模型中的变量。

3.1 临界短路比的概念

临界短路比建立了短路比与静态电压稳定之间的关系。将最大传输功率作为静态电压稳定性判据, 随着传输功率的增加, 运行点从 P-V 曲线上半支向下半支过渡, 在拐点处达到最大传输功率, 系统处于临界稳定, 此时短路比为临界短路比。当短

路比低于临界短路比时，系统运行于并网点 P-V 特性“不稳定”区域。

等效分析模型的 P-V 曲线如图 4 所示。曲线 1 系统 $Q=0$ ，曲线 2 系统 $Q=0.2\text{pu}$ 。对于曲线 1， $\Delta > 0$ 时，系统稳定，短路比大于临界短路比； $\Delta = 0$ ，系统临界稳定，短路比等于临界短路比； $\Delta < 0$ 时，系统不稳定，但此时曲线 2 系统临界稳定， Δ 的推导在下节说明。

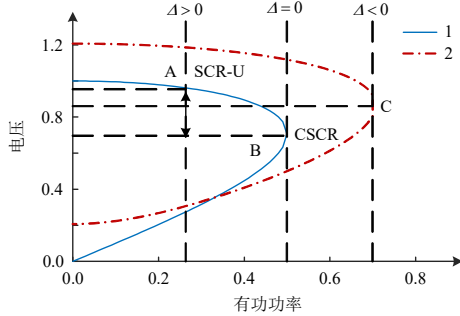


图 4 等效分析模型 P-V 曲线

Fig. 4 P-V curves of the equivalent system

3.2 基于最大有功功率的临界短路比

依据图 1(b)所示系统，并网节点处潮流方程为：

$$\dot{S} = P + jQ = \dot{U} \cdot \dot{I}^* \quad (19)$$

$$\begin{cases} P = \frac{U^2 R - UER \cos \theta + UEX \sin \theta}{R^2 + X^2} \\ Q = \frac{U^2 X - UEX \cos \theta - UER \sin \theta}{R^2 + X^2} \end{cases} \quad (20)$$

式中： \dot{E} 为等值电势； \dot{U} 为并网节点电压， θ 为电压相角； \dot{I} 为电流； \dot{Z} 为系统阻抗； R 为电阻； X 为电抗； \dot{S} 为视在功率； P 为有功功率； Q 为无功功率。

补充三角恒等式，对 P 、 Q 、 θ 进行进一步推导，获得关于并网节点电压平方的一元二次方程：

$$U^4 - 2[(RP + XQ) + E^2]U^2 + Z^2 S^2 = 0 \quad (21)$$

对式(21)进行求解，得到并网节点电压为：

$$U = E \sqrt{\frac{1 + 2\lambda \pm \sqrt{\Delta}}{2}} \quad (22)$$

$$\Delta = 1 + 4(\lambda - \mu^2) \quad (23)$$

式中： Δ 为一元二次方程的判别式； λ 、 μ 为计算因子， $\lambda = (PR + QX)/E^2$ ， $\mu = (PX - QR)/E^2$ 。

当 $\Delta = 0$ 时，并网节点电压有唯一物理解，对应于系统临界稳定状态。此时，最大传输功率 P_{\max} 及并网节点临界电压 U_{cri} 分别为：

$$P_{\max} = \frac{R(E^2 + 2QX) + EZ\sqrt{E^2 + 4QX}}{2X^2} \quad (24)$$

$$U_{\text{cri}} = \sqrt{\frac{E^2 + 2(PR + QX)}{2}} \quad (25)$$

依据短路比的定义可以看出，短路比为单调减函数。当在系统无功水平一定的情况下，结合最大传输功率 P_{\max} ，根据短路比的定义可以求取该系统的临界短路比为

$$\text{CSCR} = \frac{S_{\text{ac}}}{S_{\text{max}}} = \frac{S_{\text{ac}}}{|P_{\text{max}} + jQ|} \quad (26)$$

3.3 含无功补偿设备的临界短路比

为改善新能源并网系统的电压性能安装无功补偿设备，如图 5 所示。根据无功补偿设备的最大容量 Q_C ，采用电纳 B 对其进行表示：

$$Q_C = U^2 B \quad (27)$$

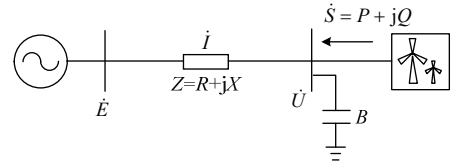


图 5 含无功补偿设备的新能源系统

Fig. 5 Renewable energy system with reactive compensation equipment

类比新能源并网系统最大传输功率的推导，同样可得并网节点电压相关的一元二次方程：

$$U^4 \beta - U^2 [E^2 + 2(PR + QX - \gamma)] + S^2 Z^2 = 0 \quad (28)$$

$$U = E \sqrt{\frac{1 + 2\lambda_B \pm \sqrt{\Delta_B}}{2[(1 - BX)^2 + B^2 R^2]}} \quad (29)$$

$$\Delta_B = 1 + 4\lambda_B - 4\mu_B^2 \quad (30)$$

式中： λ_B 、 μ_B 为计算因子， $\lambda_B = (PR + QX - QBZ^2)/E^2$ ， $\mu_B = (PX - QR - PBZ^2)/E^2$ ； γ 、 β 为与无功补偿相关的计算因子 $\gamma = QBZ^2$ ， $\beta = 1 - 2BX + B^2 Z^2$ 。

依据 $\Delta_B = 0$ 求取含有无功补偿设备的新能源并网系统最大传输功率，从而得到含有无功补偿设备的临界短路比：

$$P_{\text{Bmax}} = \frac{[R(E^2 + 2QX - 2\gamma) + EZ\sqrt{(E^2 + 4QX - 4\gamma)\beta}]}{2(X - BZ^2)^2} \quad (31)$$

$$U_{\text{Bcri}} = \sqrt{\frac{E^2 + 2(PR + QX - \gamma)}{2\beta}} \quad (32)$$

$$\text{CSCR}_B = \frac{S_{\text{ac}}}{|P_{\text{Bmax}} + jQ|} \quad (33)$$

当安装无功补偿设备时，临界短路比减小，系统稳态稳定运行能力增大，接纳新能源的规模增大。不含无功补偿设备时， $\gamma = 0$ ， $\beta = 1$ ，此时计算结果与上一节的计算结果一致。高压系统中，元件电阻通常远小于电抗，分析时忽略电阻的影响， $R = 0$ 。当新能源以单位功率因数运行， $Q = 0$ 。不含

无功补偿设备时, $B=0$ 。可见, 当 $R=0$ 、 $Q=0$ 、 $B=0$ 时, 最大传输功率及临界电压的计算与传统负荷的静态电压稳定分析一致^[22]。

本节推导的最大传输功率、临界电压以及临界短路比综合考虑了电阻、电抗、系统电势、无功补偿设备、新能源无功出力的影响, 总结几种常见场景下的最大传输功率与临界电压列入附表 A1。

3.4 临界短路比与静态电压稳定

根据 3.3 节中一元二次方程求取电压-无功、电压-有功灵敏度:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial Q} = \frac{U^2(X - BZ^2) - QZ^2}{2U^3\beta - U[E^2 + 2(PR + QX - \gamma)]} \\ \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{U^2R - PZ^2}{2U^3\beta - U[E^2 + 2(PR + QX - \gamma)]} \end{cases} \quad (34)$$

电压变化主要受无功功率的影响, 临界稳定状态下, 极小功率扰动也会导致系统电压的剧烈波动。依据 $\partial Q=0$ 求取临界稳定电压为

$$U = \sqrt{\frac{E^2 + 2(PR + QX - \gamma)}{2\beta}} \quad (35)$$

灵敏度法与最大功率法求得的系统静态临界电压一致, 各种静态指标本质上是以系统极限功率输送能力作为电压临界点。基于最大传输功率求取临界短路比反映了系统静态电压临界稳定状态, 建立了短路比指标与静态电压稳定之间的联系。

4 新能源并网系统电压支撑强度评估

4.1 临界短路比极值

临界短路比的极值代表了最弱系统的临界短路比情况, 在新能源并网系统电压支撑强度评估中可以用于划分系统的强弱。当系统潮流、阻抗与短路比之间的关系满足下式时, 判别式等于 0, 对应于各个不同的系统处于临界稳定状态时的 SCR-S, 即该系统的临界短路比:

$$CSCR-S = \frac{2U_N}{E} \left(1 - \frac{PR + QX}{S\sqrt{R^2 + X^2}}\right) \quad (36)$$

CSCR-S 代表处于临界稳定状态时系统的短路比, 用于分析临界短路比的影响因素与变化趋势。如图 6 所示, 当某一系统处于临界状态时, 其 CSCR-S 与 CSCR 的计算结果相同。

新能源并网系统的有功、无功功率从新能源流入交流系统, 临界短路比存在最大值 2。在新能源控制稳定前提下, 当短路比大于 2 时, 系统强度较高; 当短路比小于 2 时, 需要对临界短路比进行详

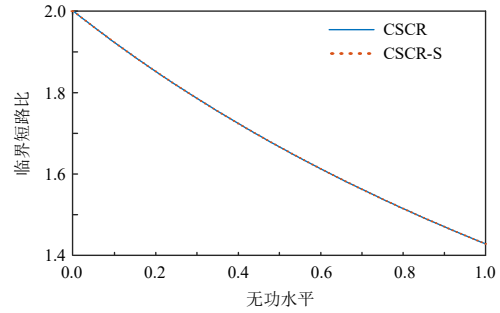


图 6 临界稳定系统临界短路比比较

Fig. 6 CSCR comparison of critically stable systems

细计算, 与短路比相比较以判断系统是否稳定。因此, 建议将临界短路比的极值 2 作为划分系统强弱标准, 短路比小于 2 的系统为弱系统。

4.2 电压支撑强度评估方法

临界短路比简化算法实现了计算方法的统一, 极值 2 实现了系统强弱判断标准的统一, 为电压支撑强度评估提供了重要参照。系统电压支撑强度这一抽象概念参照系统强弱划分标准而存在, 以临界短路比为参照点, 以短路比指标为坐标, 可以实现对系统电压支撑强度的评估, 如图 7 所示。评估所涉及的短路比指标如表 1 所示, 下标 eq 代表等效分析模型内对应物理量。

本文针对新能源并网系统构建两种评价效果相同的短路比指标: SCR-S 和 SCR-U。通过比较系

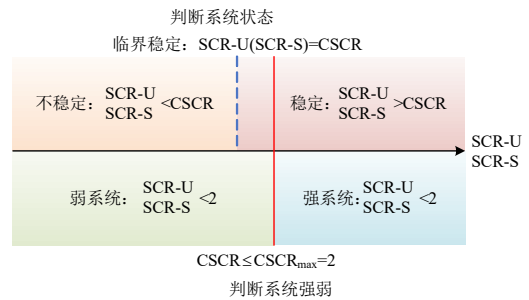


图 7 电压支撑强度评估

Fig. 7 Evaluation method of system strength

表 1 评估相关短路比指标

Table 1 SCR indexes related with evaluation

指标	含义	表达式
SCR-T	传统短路比指标	$SCR-T = \frac{S_{ac}}{P_N}$
SCR-U	基于电压计算的短路比指标	$SCR-U_i = \frac{ U_N \dot{E}_{eq,i} }{ \Delta \dot{U}_i \dot{U}_i }$
SCR-S	基于容量计算的短路比指标	$SCR-S_i = \frac{ U_N \dot{E}_{eq,i} / Z_{ii} }{ S_i + \sum_{j \neq i} \frac{Z_{ij}^* \dot{U}_i}{Z_{ii} \dot{U}_j} S_j }$
CSCR	临界短路比简化算法	$CSCR_i = \frac{S_{ac,i}}{ P_{eq,i,max} + jQ_{eq,i} }$

统短路比与临界短路比判断系统的稳定状态，当系统未达到临界稳定时，短路比与临界短路比之间存在距离，系统具备安全裕度。

1) 单馈入系统中，SCR-U(或 SCR-S、SCR-T)等于 CSCR；多馈入系统中，SCR-U(或 SCR-S)等于 CSCR，系统处于临界稳定状态；

2) 当 SCR-U(或 SCR-S)大于 CSCR，系统运行于 P-V 特性稳定区域；

3) 当 SCR-U(或 SCR-S)小于 CSCR，系统运行于 P-V 特性不稳定区域。

通过计算系统的短路比，与强弱划分标准相比较判断系统强弱：

- 1) 短路比大于 2，系统较强；
- 2) 短路比小于 2，系统较弱。

5 算例验证

基于 PSD-BPA 搭建模型，通过连续潮流法计算系统最大传输功率，建立不同无功功率水平下无电阻系统和有电阻系统仿真算例。通过建立单馈入系统算例，验证临界稳定状态下 SCR-T、SCR-U 和 CSCR 的一致性；通过建立多馈入系统算例对 SCR-T、MRSCR、SCR-U、SCR-S 的评估效果进行比较；验证通过比较短路比指标与临界短路比对系统电压支撑强度进行评估的正确性和有效性。

5.1 单馈入系统算例

单馈入系统算例中，交流系统等值阻抗如表 2 所示。基于容量计算的短路比指标 SCR-S 与传统短路比指标 SCR-T 相同。在不同无功功率水平下，算例的 P-V 曲线如图 8 所示，针对系统临界稳定状态计算各短路比指标，计算结果列于表 3。

表 2 单馈入算例参数

Table 2 Parameters of single-infeed system pu

R	交流系统阻抗	短路容量
R=0	Z=0.2i	S _{ac} =5
R≠0	Z=0.1+0.2i	S _{ac} =4.472

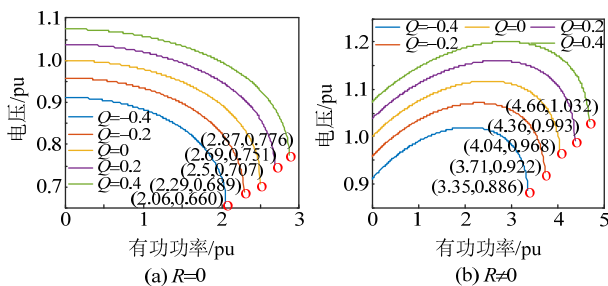


图 8 单馈入算例 P-V 曲线

Fig. 8 P-V curves of single-infeed systems

表 3 单馈入算例短路比指标计算结果

Table 3 Calculation results of single-infeed systems

R	Q	SCR-T/SCR-S	MRSCR	SCR-U	CSCR
R=0	-0.4	2.383	1.555	2.382	2.380
	-0.2	2.175	1.480	2.173	2.174
	0	2	1.417	2	2
	0.2	1.855	1.382	1.855	1.852
	0.4	1.725	1.330	1.725	1.724
R≠0	-0.4	1.326	1.166	1.326	1.324
	-0.2	1.204	1.098	1.204	1.203
	0	1.107	1.064	1.107	1.106
	0.2	1.025	0.986	1.025	1.025
	0.4	0.956	0.993	0.956	0.956

由于系统阻抗不同，R=0 与 R≠0 时，同样潮流水平下 P-V 曲线形状不同；不同的无功功率条件下，静态电压稳定的临界点不同，临界短路比不等。

在单馈入系统算例中，SCR-T、SCR-S 和 SCR-U 计算结果相等；在临界稳定状态下，SCR-S、SCR-U 与 CSCR 相等。本算例中，MRSCR 对系统电压支撑强度评估时相比较于 CSCR 偏保守。原因在于其采用运行电压计算短路容量从而得到短路比指标，而 CSCR 是基于开路电压进行计算。MRSCR 适合于需求保守性的评估场合，例如控制策略的制定等，以保证系统具有更高的安全稳定裕度。采用 SCR-U 与 CSCR 相比较对系统电压强度进行评估时则具有较高的准确性。对新能源并网系统电压支撑强度进行评估时，应根据分析目的与需求选取合理的短路比指标。

5.2 多馈入系统算例

多馈入系统算例用以验证多馈入新能源之间相互作用，对交流系统采用戴维南等值，参数如表 4 所示。分别建立有电阻和无电阻多馈入系统算例。并网点 2、3 的新能源容量确定后，不同无功水平下并网点 1 的 P-V 曲线如图 9 所示。系统处于临界稳定状态时，各短路比指标的计算结果见表 5。

表 4 多馈入算例参数

Table 4 Parameters of multi-infeed system pu

算例	交流系统阻抗	支路 1	支路 2	支路 3
R=0	0.3j	0.12j	0.8j	0.8j
R≠0	0.15+0.3j	0.06+0.12j	0.4+0.8j	0.4+0.8j

系统处于临界稳定状态时，SCR-U 和 SCR-S 具有相同的计算结果，误差是由截断误差引起，此时两者等于 CSCR。相比之下，SCR-U 的计算形式更简单，计算所需电气量可以更方便地获得。

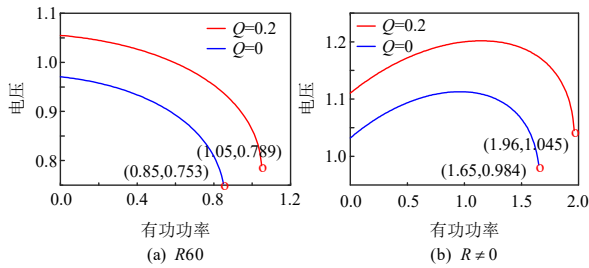


图9 多馈入算例 P-V 曲线

Fig. 9 P-V curves of multi-infeed systems

表5 多馈入算例短路比指标计算结果

Table 5 Calculation results of multi-infeed systems

R	Q	点	SCR-T	MRSCR	SCR-S	SCR-U	CSCR
R=0	0	1	2.801	1.561	2.085	2.087	2.056
		2	4.545	1.382	1.894	1.896	1.894
		3	4.545	1.382	1.894	1.896	1.894
R≠0	0.2	1	2.227	1.360	1.745	1.745	1.742
		2	4.545	1.272	1.731	1.732	1.728
		3	4.545	1.272	1.731	1.732	1.728
R≠0	0	1	1.290	1.089	1.098	1.098	1.095
		2	4.065	1.140	1.163	1.163	1.151
		3	4.065	1.140	1.163	1.164	1.151
R≠0	0.2	1	1.081	0.993	0.939	0.939	0.938
		2	4.065	1.071	1.057	1.057	1.052
		3	4.065	1.071	1.057	1.057	1.052

临界稳定时, MRSCR<CSCR, MRSCR 具有保守性; SCR-T 与 SCR-U、SCR-S 之间的差值增大, SCR-T 过于乐观。以 CSCR 为判断标准, 采用 SCR-U、SCR-S 对多馈入系统电压支撑强度进行评估时的准确性较高。

5.3 电压支撑强度评估算例

当系统正常运行时, 短路比与临界短路比之间存在距离, 系统存在稳定裕度, 当短路比小于临界短路比时系统处于不稳定状态。

针对短路容量为 500MVA 的交流系统, 当临界短路比等于 2 时, 受电压支撑能力的限制, 新能源规模最大为 250MW。基于此场景研究新能源并网规模对 SCR-U 的影响, 仿真结果如图 10 所示。0.4s 系统建立起稳定状态。随着新能源并网规模的增加, 并网点电压降低, 通过 SCR-U 计算的短路比减小。1.6s 时, 新能源规模达到最大, SCR-U=2。当新能源规模达到 250MW 后, 系统失去稳定。

进一步, 建立与 6.2 节 R=0、Q=0 多馈入系统结构相同、工况不同的仿真算例, 系统处于稳定运行工况。通过分析比较不同工况下短路比与临界短

路比, 验证电压支撑强度评估的正确性和有效性。相关短路比指标的计算结果列于表 6。

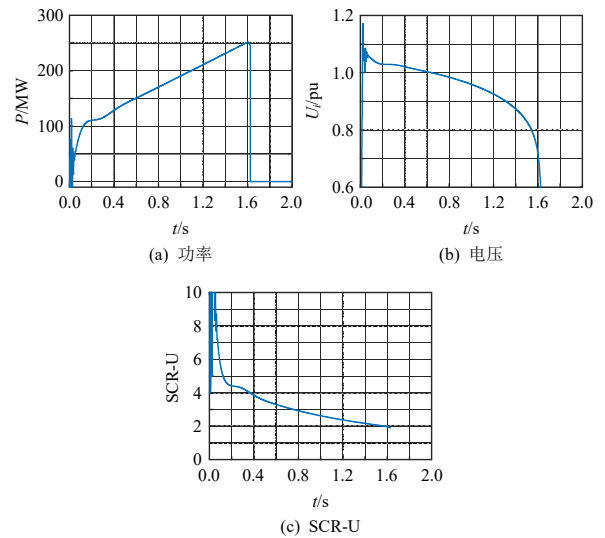


图10 新能源规模对 SCR-U 的影响

Fig. 10 Impact of renewable energy scale on SCR-U

表6 多馈入系统稳态工况短路比指标计算结果

Table 6 Calculation results of multi-infeed system with normal operation state

并网点	SCR-T	MRSCR	SCR-S	SCR-U	CSCR
1	2.976	1.760	2.183	2.184	2.056
2	4.545	1.535	1.943	1.944	1.907
3	4.545	1.535	1.943	1.944	1.907

该算例的系统结构和无功水平与 5.2 节 R=0、Q=0 多馈入系统算例相同, 有功水平不同。5.2 节算例中, 系统临界稳定, SCR-U、SCR-S 等于 CSCR。5.3 节算例中, 系统稳定, CSCR 小于 SCR-U、SCR-S, 说明系统存在稳定裕度, 传输功率有增加空间, 新能源规模可以适当增加。

6 结论

本文构建了两种新能源并网系统的短路比指标, 提出临界短路比数值(极值)的计算方法, 以临界短路比为参照点, 以短路比指标为坐标对新能源并网系统电压支撑强度进行评估:

1) 提出基于容量计算的短路比指标 SCR-S, SCR-S 与传统短路比指标概念上保持一致, 在单馈入系统中两者相同, 但在多馈入系统中 SCR-S 具有更高的准确性, 可以识别系统的薄弱点。

2) 提出基于电压计算的短路比指标 SCR-U, 通过比较交流系统提供的电压支撑和新能源并网引起的电压变化之间的相对强弱, 建立短路比与并网点电压之间的数学关系。SCR-U 与 SCR-S 形式

不同但物理本质上完全等价且计算结果相同。相比之下, SCR-U 采用电压进行计算可方便地进行工程应用, 对基于响应的系统电压支撑强度实时监测具有重要意义。

3) 依据临界短路比的概念, 在推导系统最大传输功率的基础上计算临界短路比, 并提出临界短路比极值计算方法。当短路比大于临界短路比时, 系统处于稳态。建议将临界短路比的极值 2 作为划分系统强弱的标准: $SCR-U > 2$ 或 $SCR-S > 2$ 的系统为强系统, $SCR-U < 2$ 或 $SCR-S < 2$ 的系统为弱系统, 实现临界短路比算法与系统强弱判断标准的统一。

4) 受新能源动态特性影响, 新能源并网系统可能在未达到静态电压稳定时便已失稳, 静态稳定极限是系统稳定运行的必要非充分条件。需要进一步研究新能源动态特性对系统稳定性的影响, 提高新能源并网系统运行的稳定性。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities: IEEE Std 1204-1997[S]. IEEE, 1997.
- [2] Conseil International Des Grands Reseaux Electriques. Connection of wind farms to weak AC networks[R]. 2016.
- [3] STRACHAN N P W, JOVCIC D. Stability of a variable-speed permanent magnet wind generator with weak AC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2779-2788.
- [4] LEE D H A, ANDERSSON G. An equivalent single-infeed model of multi-infeed HVDC systems for voltage and power stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 303-312.
- [5] 于琳, 孙华东, 徐式蕴, 等. 电力电子设备接入电压支撑强度量化评估指标综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021[2021-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20211102.1440.003.html>.
YU Lin, SUN Huadong, XU Shiyun, et al. Overview of strength quantification indexes of power system with power electronic equipment[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021[2021-12-29]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20211102.1440.003.html\(in Chinese\)](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20211102.1440.003.html(in Chinese)).
- [6] 孙华东, 王一鸣, 高磊, 等. 高比例电力电子电力系统稳定性的统一性判据研究(一): 场站稳定判据[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021[2021-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1658.008.html>.
SUN Huadong, WANG Yiming, GAO Lei, et al. Research on unification stability criterion for the power electronics dominated power system(I): criterion of the power-electronic interfaced plant[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021[2021-12-29]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1658.008.html\(in Chinese\)](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1658.008.html(in Chinese)).
- [7] 孙华东, 王一鸣, 高磊, 等. 高比例电力电子电力系统稳定性的统一性判据研究(二): 区域稳定判据[J/OL]. 中国电机工程学报, 2021[2021-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1722.011.html>.
SUN Huadong, WANG Yiming, GAO Lei, et al. Research on unification stability criterion for the power electronics dominated power system(II): criterion of the power-electronic interfaced subsystem[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2021 [2021-12-29]. [http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1722.011.html\(in Chinese\)](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20210809.1722.011.html(in Chinese)).
- [8] ZHANG Yang, 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. National Harbor: IEEE, 2014: 1-5.
- [9] The Minnesota Utilities and Transmission Companies, Minnesota Department of Commerce. Minnesota renewable energy integration and transmission study[R]. The Minnesota Utilities and Transmission Companies, 2014.
- [10] WU Di, MA Feng, JIANG J N. A fast weakness analysis method for renewable energy integration[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Portland: IEEE, 2018: 1-5.
- [11] 朱凌志, 曲立楠, 刘纯, 等. 新能源发电集群的改进等效短路比计算方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 74-82.
ZHU Lingzhi, QU Li'nian, LIU Chun, et al. Improved calculation method of equivalent short-circuit ratio for power generation cluster of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 74-82(in Chinese).
- [12] 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): 497-505.
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): 497-505(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 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): 5516-5526.

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): 5516-5526(in Chinese).

[15] 王焯, 郭春义, 赵成勇. 基于小干扰稳定性和运行约束条件的MMC系统临界运行短路比评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2853-2863.

WANG Ye, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong. A quantitative evaluation approach for critical operating SCR of MMC system based on small-signal stability and operating constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2853-2863(in Chinese).

[16] 黄锐, 兰洲, 辛焕海, 等. 基于广义短路比的光伏多馈入系统容量优化方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 147-154.

HUANG Rui, LAN Zhou, XIN Huanhai, et al. Capacity optimization method for multi-infeed photovoltaic system based on generalized short circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 147-154(in Chinese).

[17] WU Di, LI Gangan, 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.

[18] 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(in Chinese).

[19] HAU AIK D L, ANDERSSON G. Impact of renewable energy sources on steady-state stability of weak AC/DC systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 419-430.

[20] CHEN Junru, MILANO F, O'DONNELL T. Assessment of grid-feeding converter voltage stability[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3980-3982.

[21] 张宇, 蔡旭, 张琛, 等. 并网变换器的暂态同步稳定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1687-1702.

ZHANG Yu, CAI Xu, ZHANG Chen, et al. Transient synchronization stability analysis of voltage source

converters: a review[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1687-1702(in Chinese).

[22] TAYLOR C W. 电力系统电压稳定[M]. 王伟胜, 译. 北京: 中国电力出版社, 2002.

TAYLOR C W. Power system voltage stability[M]. WANG Weisheng, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2002(in Chinese).

附录 A

表 A1 几种场景下最大传输功率与临界电压

Table A1 Maximum transmission power and critical voltage

计算场景	计算表达式
$B \neq 0$ $R \neq 0$ $Q \neq 0$	$P_{\max} = \frac{R(E^2 + 2QX - 2\gamma) + EZ\sqrt{(E^2 + 4QX - 4\gamma)\beta}}{2(X - BZ^2)^2}$ $U_{\text{cri}} = \sqrt{\frac{E^2 + 2(PR + QX) - 2\gamma}{2\beta}}$
$B \neq 0$ $R = 0$ $Q \neq 0$	$P_{\max} = \frac{E\sqrt{E^2 + 4QX(1 - BX)}}{2X 1 - BX }$ $U_{\text{cri}} = \frac{\sqrt{E^2 + 2QX(1 - BX)}}{\sqrt{2} 1 - BX }$
$B \neq 0$ $R = 0$ $Q = 0$	$P_{\max} = \frac{E^2}{2X 1 - BX }$ $U_{\text{cri}} = \frac{E}{\sqrt{2} 1 - BX }$
$B = 0$ $R \neq 0$ $Q \neq 0$	$P_{\max} = \frac{R(E^2 + 2QX) + EZ\sqrt{E^2 + 4QX}}{2X^2}$ $U_{\text{cri}} = \sqrt{\frac{E^2 + 2(PR + QX)}{2}}$
$B = 0$ $R = 0$ $Q = 0$	$P_{\max} = \frac{E^2}{2X}$ $U_{\text{cri}} = \frac{E}{\sqrt{2}}$



于琳

在线出版日期: 2021-12-30。

收稿日期: 2021-09-26。

作者简介:

于琳(1991), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析与控制, ylplum@163.com;

*通信作者: 孙华东(1975), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制等, sunhd@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Short Circuit Ratio Index Analysis and Critical Short Circuit Ratio Calculation of Renewable Energy Grid-connected System

YU Lin, SUN Huadong*, ZHAO Bing, XU Shiyun, ZHANG Jian, LI Zonghan

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute))

KEY WORDS: Short circuit ratio; critical short circuit ratio; renewable energy grid-connected system; system strength; maximum transmission power

The short circuit ratio (SCR) is an important index for evaluating the system strength of renewable energy grid-connected systems. But there is a contradiction between its accuracy and practicability, and the critical short circuit ratio (CSCR) is not uniform due to numerous construction methods. An accurate and simple SCR is significant. This paper analyzes the SCR index of the renewable energy grid-connected system and proposes a calculation method for the CSCR to realize the system strength evaluation.

Although the voltage stability problem involves the dynamic characteristics of the power system, the static analysis method based on power flow calculation is useful when performing a fast approximate analysis of the voltage stability problem. Based on the equivalent model, the mathematical analysis is carried out to derive the short circuit capacity of ac system and the equivalent capacity of the renewable energy.

Considering the interaction among the infeed renewable energy, the SCR-S based on equivalent capacity at the i -th node is mathematically expressed as:

$$SCR-S_i = \frac{S_{ac,i}}{S_{eq,i}} = \frac{|U_N \dot{E}_{eq,i} / \dot{Z}_{ii}|}{|\dot{S}_i + \sum_{j \neq i} \frac{\dot{Z}_{ij}^* \dot{U}_i}{\dot{Z}_{ii}^* \dot{U}_j} \dot{S}_j|} \quad (1)$$

where U_N is the nominal voltage at the i -th node; \dot{U}_i is the node voltage; $\dot{E}_{eq,i}$ is the potential provided by the synchronous generator; \dot{Z}_{ij} is the mutual impedance reflecting the interaction between two nodes and \dot{Z}_{ii} is the self-impedance; \dot{S}_i and \dot{S}_j are the capacity of the renewable energy directly connected at the i -th node and the j -th node.

The SCR-U is calculated by the voltage and it explains the relationship between the SCR and the node voltage through mathematical expression clearly:

$$SCR-U_i = \frac{|U_N \dot{E}_{eq,i}|}{|\Delta \dot{U}_i \dot{U}_i|} \quad (2)$$

The relationship between the SCR and the node voltage change is shown in Fig. 1. The lower system strength, the larger voltage disturbance caused by renewable energy connected to the system, and the smaller SCR.

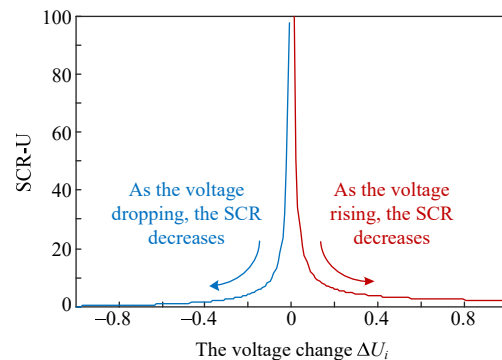


Fig. 1 Relationship between SCR-U and ΔU_i

Based on the maximum power transfer theorem, the corresponding system voltage has a unique value at the voltage collapse point. The mathematical expression of CSCR can be derived as:

$$CSCR = \frac{S_{ac}}{S_{max}} = \frac{S_{ac}}{|P_{max} + jQ|} \quad (3)$$

$$P_{max} = \frac{R(E^2 + 2QX) + EZ\sqrt{E^2 + 4QX}}{2X^2} \quad (4)$$

There are two equivalent SCR indexes: the SCR-S and the SCR-U. The SCR-S explains the concept that is proportional to the fault level and inversely proportional to the effective penetration of renewable energy system. The SCR-U explains the relationship between the SCR and the node voltage through mathematical expression. Compared with SCR-S, the SCR-U is more conducive in the application of the actual engineering systems. It just needs the voltage data monitored in real-time rather than complex system parameters. Furthermore, the CSCR are derived. The distance between the SCR-U and the CSCR represents the voltage stability margin effectively.