

电力电子装备多馈入系统广义短路比 计算规范

8 Generalized Short-Circuit Ratio Calculation Specification for Power
9 Electronics Infeed System

10 (与国际标准一致性程度的标识)

11 (征求意见稿)

13

14

目 次

15 前 言 III

16 引 言 IV

17 1 范围 2

18 2 规范性引用文件 2

19 3 术语和定义 2

20 4 符号、代号和缩略语 3

21 5 总则 3

22 6 电网强度评估与计算方法 4

23 6.1 数据准备 4

24 6.2 基本要求 4

25 6.3 潮流和短路容量计算 4

26 6.4 自阻抗和互阻抗计算 4

27 6.5 广义短路比计算 5

28 7 装备耐受度评估与计算方法 5

29 7.1 数据准备 5

30 7.2 已知控制参数的装备临界短路比解析计算 5

31 8 系统强度评估与计算方法 6

32

前 言

33

34

35 本文件按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定
36 起草。

37 请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

38 本文件由浙江省电力学会提出。

39 本文件由浙江省电力学会新型电力系统规划专业委员会技术归口和解释。

40 本文件起草单位：国网浙江省电力有限公司经济技术研究院、浙江大学、清华大学、浙江运达风电
41 股份有限公司、正泰集团股份有限公司、国网温州供电公司。

42 本文件主要起草人：王蕾、辛焕海、但扬清、孙可、何英静、刘锋、高晖胜、张夏辉、袁辉、孙飞
43 飞、倪秋龙、李大任、张静、王晨轩、沈杰、李知艺、沈志恒、许恩超、朱海立、武佳卉、王岑峰、丁
44 一凡、杨宏基、董炜、向鑫、周旭、史晓鸣。

45 本文件首次发布。

46 本文件在执行过程中的意见或建议反馈至浙江省电力学会标准工作委员会（地址：浙江省杭州市南
47 复路1号，邮编：310008，网址：<http://www.zjsee.org/>，邮箱：zjseeorg_bz@163.com）。

48

49

引 言

50 电力电子装备馈入系统强度评估与计算的目的是通过对电力电子装备接入点处装备与电网的短路
51 比计算和分析研究，评价系统静态电压稳定水平，用以指导直流与新能源多馈入系统规划、设计、建设
52 以及科研中的相关工作。

电力电子装备多馈入系统广义短路比 计算规范

53

54

55

56 1 范围

57 本文件规定了电力系统电压支撑强度计算总则、直流馈入电网的短路比计算方法和判据、新能源并
58 网系统的短路比计算方法和判据。

59 本文件适用于常规直流、新能源发电等电力电子装备馈入的交流电力系统规划、设计、建设、生产
60 运行、科学试验、装备制造中。电力系统各部门在进行规划、设计、装备制造、基建、运行及用途管理
61 等方面的工作时，可应用本计算方法。

62 2 规范性引用文件

63 下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，
64 仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本
65 文件。

66 GB 38755—2019 电力系统安全稳定导则

67 GB/T 38969—2020 电力系统技术导则

68 GB/T 40581—2021 电力系统安全稳定计算规范

69 GB/T 15544.1 三相交流系统短路电流计算规范

70 3 术语和定义

71 GB 38755—2019 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

72 3.1

73 **电力电子装备** power electronic equipment

74 以电力电子器件为接口的换流装备。

75 注：以场站整体为计算单元时，需将场站聚合为单个电力电子装备。

76 3.2

77 **静态电压稳定** steady-state voltage stability

78 电力系统受到小扰动后，系统所有母线保持稳定电压的能力。

79 [来源：GB 38755—2019，2.2.2.2]

80 3.3

81 **直流多馈入系统** multi-infeed HVDC system

82 通过高压交流电网相连的多个高压直流装备构成的电气系统。

83 注：包括交流输电线路、交流母线、交流滤波器、换流变压器、换流器以及其它辅助装备等。

84 3.4

85 **新能源多馈入系统** multi-infeed renewable energy systems

86 通过交流电网相连的多个新能源装备或场站构成的电气系统。

87 注：包括输电线路、升压变压器、新能源并网装备、储能装备、调相机、STATCOM 等。

88 3.5

89 **系统电压支撑强度** system voltage support strength

90 系统稳态运行期间遭受小扰动后维持静态电压稳定的能力，简称系统强度。

91 3.6

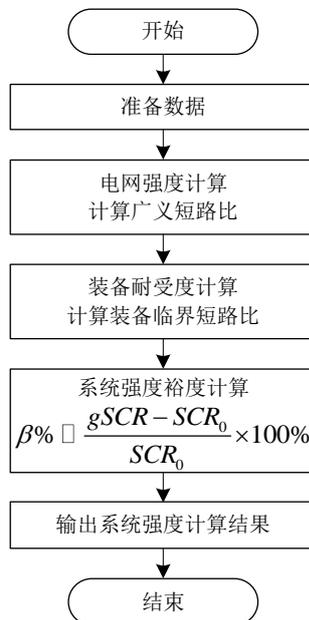
92 **电网电压支撑强度** grid voltage support strength

93 交流电网对并网装备的静态电压支撑能力，简称电网强度。

- 94 3.7
- 95 装备低短路比耐受度 equipment low short-circuit ratio tolerance
- 96 静态电压稳定前提下, 单个电力电子装备对低短路比交流电网的耐受能力, 简称装备耐受度。
- 97 3.8
- 98 广义短路比 generalized short-circuit ratio
- 99 由多电力电子装备端口工频节点阻抗和额定功率信息构成的矩阵最小特征值。
- 100 注: 当考虑运行工况时, 需用多电力电子装备端口工频节点阻抗、运行功率和端口电压信息构成的矩阵进行计算。
- 101 3.9
- 102 装备临界短路比 equipment Critical Short-Circuit Ratio
- 103 保证单个电力电子装备满足静态电压稳定所需的最小短路比。
- 104 3.10
- 105 新能源发电单元 renewable energy generating unit
- 106 利用风能或太阳能等资源发电并网的最小装备集, 如光伏方阵和光伏逆变器构成的发电系统、风电
- 107 机组等。
- 108 3.11
- 109 电力电子装备并网点 point of power electronic equipment connection
- 110 电力电子装备连接到交流系统的参考点。
- 111 3.12
- 112 临界静态电压稳定 critical steady-state voltage stability
- 113 系统在特定的运行条件下, 刚好可保持静态电压稳定的状态, 简称临界稳定。
- 114 4 符号、代号和缩略语
- 115 下列符号、代号和缩略语适用于本文件。
- 116 $\lambda(\cdot)$: 矩阵所有特征值构成的集合
- 117 \mathbf{P}_e : 由各电力电子装备实际出力或额定容量构成的对角矩阵
- 118 P_{ei} : 第 i 个装备的实际出力或额定容量
- 119 \mathbf{Z} : 工频节点阻抗矩阵
- 120 $\min \lambda(\cdot)$: 矩阵最小特征值
- 121 \mathbf{S} : 表示 ∂P_{ei} 、 ∂Q_{ei} 关于 ∂U_i 、 $\partial \theta_i$ 的灵敏度构成的雅克比矩阵, ∂ 表示偏导数
- 122 \mathbf{Z}_m : 矩阵 \mathbf{Z} 中各元素取模值后得到的实数矩阵
- 123 \mathbf{B} : 工频节点导纳矩阵, 对于感性占优网络, 令自导纳元素为正、互导纳元素一般为负
- 124 U_i : 第 i 个电力电子装备并网点的换流母线电压有效值幅值
- 125 $\beta\%$: 系统强度裕度
- 126 $\beta_0\%$: 系统强度裕度最低要求
- 127 n : 电力电子装备并网点总数
- 128 $\text{diag}(U_i^2/P_{ei})$: 对角矩阵, 其对角元素为 U_i^2/P_{ei} , $i = 1, 2, \dots, n$
- 129 \mathbf{u}_1^T : 矩阵 $\mathbf{P}_e^{-1}\mathbf{Z}_m^{-1}$ 最小特征值的左特征向量
- 130 \mathbf{v}_1 : 矩阵 $\mathbf{P}_e^{-1}\mathbf{Z}_m^{-1}$ 最小特征值的右特征向量
- 131 5 总则
- 132 5.1 电力电子装备接入电网的规划设计和调度运行阶段均应开展系统强度评估与计算。
- 133 5.2 系统强度评估与计算对象包括直流多馈入系统、新能源多馈入系统。
- 134 5.3 采用典型定有功-无功控制的新能源设备临界短路比为 1。
- 135 5.4 对于采用定有功-无功控制的柔性直流, 将柔性直流看成新能源装备, 临界短路比也为 1。

136 5.5 电力电子装备系统强度评估与计算流程包括数据准备、电网强度评估与计算、装备耐受度评估与
137 计算、系统强度评估与计算，见图 1。

138



139

140

图 1 电力电子装备系统强度计算流程

141 6 电网强度评估与计算方法

142 6.1 数据准备

143 6.1.1 电网强度采用广义短路比表征和量化。

144 6.1.2 广义短路比的计算数据应包括潮流和短路电流计算数据。

145 6.1.3 潮流数据应考虑常规电源和新能源开机方式、直流运行方式、负荷方式、输变电装备检修方式
146 等因素。潮流数据宜按照如下原则考虑：

147 a) 直流多馈入场景广义短路比计算时，开机容量按照装机容量设定，直流出力应根据同区域直流
148 出力历史运行数据或资源评估数据设定；

149 b) 新能源多馈入场景广义短路计算时，开机容量按照规划装机容量设定，新能源出力应根据同区
150 域新能源出力历史运行数据或资源评估数据设定。

151 6.1.4 广义短路比计算的潮流方式应根据实际电网情况确定，兼顾正常运行方式和检修方式；直流运
152 行方式至少应考虑满功率运行方式、低功率运行方式；新能源发电方式至少应考虑风电大发、光伏大发、
153 风电光伏联合大发等典型场景。

154 6.1.5 短路电流计算数据中同步发电机、调相机、负荷等应采用包含暂态、次暂态参数的模型。

155 6.2 基本要求

156 6.2.1 计算流程包括潮流和短路容量计算、自阻抗和互阻抗计算、广义短路比计算。

157 6.3 潮流和短路容量计算

158 6.3.1 根据 6.1 设定的潮流方式，开展潮流计算，并保证各节点电压在合理范围内。记录电力电子装
159 备并网点电压、有功和无功功率。

160 6.3.2 计算电力电子装备并网点的短路容量，其中短路电流应采用三相对称短路电流初始值，短路电
161 流计算方法参照 GB/T 15544.1，计算时应不考虑新能源的短路电流贡献。

162 6.4 自阻抗和互阻抗计算

163 6.4.1 计算各电力电子装备并网点的自阻抗、各电力电子装备并网节点之间的互阻抗。自阻抗和互阻抗
164 的计算应考虑各类同步电机、负荷以及直流的影响。

165 6.5 广义短路比计算

166 6.5.1 广义短路比由式(1)计算。

$$167 \quad gSCR = \min \lambda(\mathbf{P}_e^{-1}\mathbf{S}) \dots\dots\dots (1)$$

168 6.5.2 忽略线路电阻, 广义短路比计算可简化为式(2)。

$$169 \quad gSCR = \min \lambda(\mathbf{P}_e^{-1}\mathbf{S}) \dots\dots\dots (2)$$

170 6.5.3 若考虑电网实际运行工况, 广义短路比由式(3)计算, 也称广义运行短路比。

$$171 \quad gSCR = \min \lambda(\text{diag}(U_i^2/P_{ei})\mathbf{S}) \dots\dots\dots (3)$$

172 注: 当电网为纯感性网络或电网线路阻抗比相同且忽略同步机励磁时, 灵敏度矩阵 \mathbf{S} 可用工频节点导纳
173 矩阵 \mathbf{B} 来代替。此外, 当线路阻抗比不一致时, 节点导纳矩阵 \mathbf{B} 可用 \mathbf{Z}_m 近似表示。

174 6.5.4 对于构网型装备和调相机, 可视为含内电抗的理想电压源。

175 6.5.5 对于采用定有功-无功控制的柔性直流, 应将柔性直流看成恒阻抗负荷, 对网络进行修正。

176 7 装备耐受度评估与计算方法

177 7.1 数据准备

178 7.1.1 装备耐受度采用装备临界短路比表征和量化。

179 7.1.2 装备临界短路比的计算数据应包括广义短路比计算数据、装备控制和结构参数数据, 若装备控
180 制和结构参数未知, 应提供黑箱模型。

181 7.2 已知控制参数的装备临界短路比解析计算

182 7.2.1 应采用解析计算法进行装备耐受度计算, 建立包含单个装备和交流电网的闭环系统灵敏度方程,
183 解析计算得到装备临界短路比。

184 7.2.2 直流多馈入系统临界短路比计算

185 对于包含常规直流的多馈入系统, 装备临界短路比应基于各个馈入直流端口外特性, 通过对应的特
186 征向量加权求取, 其中直流端口外特性表示为 T_i ($i = 1 \dots n$, n 为直流馈入总数), 在受端定熄弧角控
187 制方式下外特性表示为式(4):

$$188 \quad T_i = 2P_{ei}\sigma_i K(\sigma_i) + 2\omega B_{ci}U_i^2 \dots\dots\dots (4)$$

189 而在受端定直流电压控制方式下外特性表示为式(5):

$$190 \quad T_i = (\sigma_i - \cos \gamma_i)P_{ei}K(\sigma_i) + 2\omega B_{ci}U_i^2 \dots\dots\dots (5)$$

191 式中:

192 P_{ei} ——第 i 个馈入直流的稳态直流功率;

193 U_i ——第 i 个馈入直流的换流母线电压有效值幅值;

194 B_{ci} ——第 i 个馈入直流的换流母线处无功补偿电容电纳;

195 ω ——系统角频率;

196 γ_i ——第 i 个馈入直流的稳态熄弧角;

197 σ_i ——第 i 个馈入直流的常参数, 由式(6)计算。

$$198 \quad \sigma_i = X_i I_{ei} / (\sqrt{2}K_i U_i) \dots\dots\dots (6)$$

199 式中:

200 X_i ——第 i 个馈入直流的换相电抗值;

201 I_{ei} ——第 i 个馈入直流的稳态直流电流;

202 K_i ——第 i 个馈入直流的换流变压器变比(从网络侧折算至阀侧);

203 $K_i(\sigma_i)$ ——定义第 i 个馈入直流的常参数, 由式(7)计算。

$$204 \quad K_i(\sigma_i) = \frac{1}{(\cos \gamma_i - \sigma_i)^2 \sqrt{1 - (\cos \gamma_i - \sigma_i)^2}} \dots\dots\dots (7)$$

205 等效加权后系统的端口特性表示为 \bar{T} ，由式（8）计算。
206

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^n \mu_{1,i} \nu_{1,i} T_i \dots\dots\dots (8)$$

207 式中：

208 $\mu_{1,i}$ ——矩阵 $\mathbf{P}_e^d \mathbf{B}$ 最小特征值归一化后的左特征向量的第 i 个元素；

209 $\nu_{1,i}$ ——矩阵 $\mathbf{P}_e^d \mathbf{B}$ 最小特征值归一化后的右特征向量的第 i 个元素；

210 \mathbf{B} ——从 n 个馈入直流换流母线节点向电网侧看过去的降阶节点导纳矩阵（方阵）。

211 基于加权后系统的端口特性由式（9）计算装备临界短路比 SCR_0 。

212

$$SCR_0 = \frac{\bar{T} + \sqrt{\bar{T}^2 + 4}}{2} \dots\dots\dots (9)$$

213 8 系统强度评估与计算方法

214 8.1 含电力电子设备的馈入系统强度采用广义短路比和装备临界短路比表征和量化。

215 8.2 对于直流多馈入系统/新能源多馈入系统，系统强度裕度 $\beta\%$ 定义为式（10）。

216

$$\beta\% \square \frac{gSCR - SCR_0}{SCR_0} \times 100\% \geq \beta_0\% \dots\dots\dots (10)$$

217 8.3 若电力电子装备构成的多馈入系统满足预设最低裕度要求，则认为系统足够强，其运行风险低；
218 当系统强度裕度 $\beta\%$ 小于 $\beta_0\%$ 时，系统强度较弱，不满足需求；当系统强度裕度 $\beta\%$ 小于 0 时，系统不
219 稳定。

220 8.4 当系统强度裕度 $\beta\%$ 介于 0 至最低裕度要求 $\beta_0\%$ 之间，应进行电磁暂态和机电暂态时域仿真计算，
221 确保系统承受扰动能力满足 GB 38755 规定的安全稳定标准。