

## 计及有源设备“质”“量”差异的直流短路比

郑超<sup>1</sup>, 吕思卓<sup>1</sup>, 马世英<sup>1</sup>, 高凯<sup>2</sup>, 张鑫<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006)

**摘要:**提出了一种计及有源设备动态特性差异——无功属性“质”的差异和无功大小“量”的差异的直流短路比新指标 MISCR<sub>CQQ</sub>, 并给出了其计算流程。通过大容量感应电动机负荷接入的多直流馈入受端系统仿真结果表明, 所提直流短路比的数值大小的变化趋势与电网动态电压支撑能力的变化态势具有一致性, 可有效解决多源环境下采用传统短路比评估失效的问题。

**关键词:**短路比; 电网强度; 动态电压支撑; 有源设备; 多类型; 特性差异

**中图分类号:** TM 721.1

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.021

## 0 引言

短路电流或短路容量是电网的一项重要电气参数, 是设计和校验设备机械强度、断路器遮断能力以及整定继电保护参数的重要依据<sup>[1]</sup>, 由其衍生出的相关指标, 如直流短路比(SCR), 被广泛应用于评估电网的强度、改善动态电压恢复特性、优化规划方案等<sup>[2-6]</sup>。

短路电流计算, 通常是通过网络方程求解, 得到电网中各有源设备注入故障点的总的短路电流周期分量。针对以常规发电机(常规水电、火电及核电等旋转电机)为主的有源设备(提供短路电流的设备)的短路电流计算方法, 国内外学者已开展了大量的研究工作<sup>[7-10]</sup>。近年来, 在提高计算精度和适应新型有源设备接入等需求的共同驱动下, 针对短路电流计算的相关研究持续深入。围绕感应电动机负荷对短路电流的影响, 文献[11]分析了感应电动机负荷反馈短路电流的特性及其与电动机容量的关系; 文献[12]提出了适应电动机电磁暂态过程的短路电流修正计算方法。围绕新能源风电机组并网对短路电流的影响, 文献[13-14]分析了异步、双馈2类风机的短路电流特性并提出了实用计算步骤; 文献[15]提出了考虑风机Crowbar电阻影响的短路电流计算策略。围绕直流馈入对短路电流的影响, 文献[16]分析了逆变侧交流系统三相短路过程中直流贡献短路电流的机理并提出了计算方法。由于着重关注设备机械强度、断路器遮断能力设计与校验以及继电保护参数整定等应用, 因此以上研究只关注短路电流的幅值大小, 均未对有源设备的差异加以

区别分析。

SCR是一种用于评价交流电网相对强度和动态电压支撑能力的定量指标, 其定义于短路电流或短路容量等电网静态电气参数之上<sup>[17]</sup>。国内学者基于传统SCR, 进一步研究提出了计及直流外特性SCR、无功有效SCR以及广义SCR等新的改进指标<sup>[18-20]</sup>。SCR指标定义之初, 电网除常规发电机外, 其他有源设备提供的短路电流可忽略不计。随着“类型单一、特性同一”的常规发电机供给的短路电流增大, SCR数值和电网动态无功容量也将随之单调增大, 因此, 基于这一认识, 形成了以下的评判逻辑: SCR数值越大, 则电网动态电压支撑能力越优<sup>[21-24]</sup>。随着感应电动机、规模化风电和光伏等多类型有源设备的快速发展, 不同设备已表现出明显不同的特性。然而, 在传统SCR以及改进SCR计算中, 仍未对“类型多样、特性迥异”的有源设备做区别分析, 由此导致SCR面临评价失效的问题, 即SCR越大, 电压支撑能力反而越弱, 与既有评判逻辑相悖的问题。

针对这一失效问题, 本文在分析短路电流组成及传统多直流馈入短路比(MISCR)局限性的基础上, 提出了一种计及有源设备动态特性差异的SCR新指标, 包括动态无功属性“质”的差异和动态无功大小“量”的差异2个方面, 并给出了新指标的计算流程。大容量感应电动机接入的多直流馈入受端系统的仿真结果验证了新指标的有效性, 即新的SCR指标大小变化趋势与交流电网动态电压支撑能力变化态势二者具有一致性。

## 1 传统 MISCR 及局限性

## 1.1 传统 MISCR

在多直流馈入系统中, 交直流相互影响, 加之多直流交互耦合作用, 使得电网动态稳定问题十分复杂, 其中电压稳定问题尤为突出。动态电压支撑能力对维持直流稳定运行和交流电网电压稳定性有显著的影响, 国内外普遍采用 MISCR 定量评估这一

收稿日期: 2018-06-11; 修回日期: 2019-03-25

基金项目: 国家电网公司科技项目(系统保护动作行为全过程智能分析、控制决策与评价关键技术研究)(XT71-18-022)

Project supported by the Science and Technology Program of SGCC(Research on the Key Techniques of Whole Process Intelligent Analysis, Control Decision and Evaluation about System Protection Action Behavior)(XT71-18-022)

能力。

多直流馈入系统如图1所示。图中,  $P_d$  为直流功率;  $Q_c$  为容性补偿功率;  $U_{Ni}$  为换流母线  $i$  的额定电压。该系统中第  $i$  回直流 MISCRI 的定义如式(1)所示。

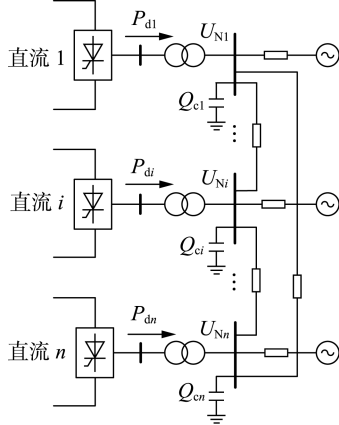


图1 多直流馈入系统

Fig.1 Multi-infeed HVDC system

$$\text{MISCRI} = \frac{\sqrt{3} U_{Ni} I''_{Fi}}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{dj}} = \frac{S_i}{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{dj}} \quad (1)$$

其中,  $I''_{Fi}$ 、 $S_i$  分别为换流母线三相短路电流周期分量的幅值和三相短路容量;  $\sigma_{ij}$  为直流  $i$  与直流  $j$  间的相互影响因子, 如式(2)所示。

$$\sigma_{ij} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} = \frac{Z_{ij}}{Z_{ii}} \quad (2)$$

其中,  $\Delta U_i$ 、 $\Delta U_j$  分别为在第  $i$  回直流换流母线上施加无功扰动时直流  $i$  与直流  $j$  换流母线电压的变化量;  $Z_{ii}$ 、 $Z_{ij}$  分别为等值阻抗矩阵中直流  $i$  换流母线对应的自阻抗和互阻抗。作为 MISCRI 的特例, SCRI 的计算公式如式(3)所示。

$$\text{SCRI} = \frac{\sqrt{3} U_{Ni} I''_{Fi}}{P_{di}} = \frac{S_i}{P_{di}} \quad (3)$$

通常认为, MISCRI 或 SCR 数值大小、交流电网强度以及电压支撑能力三者之间具有单调的正相关关联, 即 SCR 数值越大, 电网越强, 电压支撑能力越优; 反之, 则电网越弱, 电压支撑能力越差。在此基础上, 国内外研究取得共识并制定了评判逻辑: MISCRI 或 SCR 的值大于 3.0, 则视交流电网为强系统; 介于 2.0 与 3.0 之间, 则为弱系统; 小于 2.0, 则为极弱系统<sup>[15-16]</sup>。

## 1.2 短路电流组成及传统 MISCRI 局限性分析

### 1.2.1 短路电流组成分析

SCR 计算中的重要参量——换流母线三相短路电流周期分量的幅值  $I''_F$ , 是系统中所有有源设备向故障点注入短路电流的线性叠加<sup>[25]</sup>。在提供短路

电流的有源设备由常规发电机向大容量感应电动机以及规模化风电、光伏等多类型设备发展的条件下, 短路电流的组成成分也相应呈现多元化, 如图2和式(4)所示。

$$I''_F = I''_G + I''_M + I''_W + I''_P = \sum_{g=1}^G \frac{E''_{Gg}}{Z_{Gg}} + \sum_{m=1}^M \frac{E''_{Mm}}{Z_{Mm}} + \sum_{w=1}^W \frac{E''_{Ww}}{Z_{Ww}} + \sum_{p=1}^P \frac{E''_{Pp}}{Z_{Pp}} \quad (4)$$

其中,  $I''_G$ 、 $I''_M$ 、 $I''_W$  和  $I''_P$  分别为常规发电机、感应电动机、风电和光伏注入故障点的短路电流;  $E''_{Gg}$ 、 $E''_{Mm}$ 、 $E''_{Ww}$ 、 $E''_{Pp}$  和  $Z_{Gg}$ 、 $Z_{Mm}$ 、 $Z_{Ww}$ 、 $Z_{Pp}$  分别为各类有源设备等值内电势及其与故障点间的转移阻抗;  $G$ 、 $M$ 、 $W$  和  $P$  分别为各类有源设备中所含元件的总数。

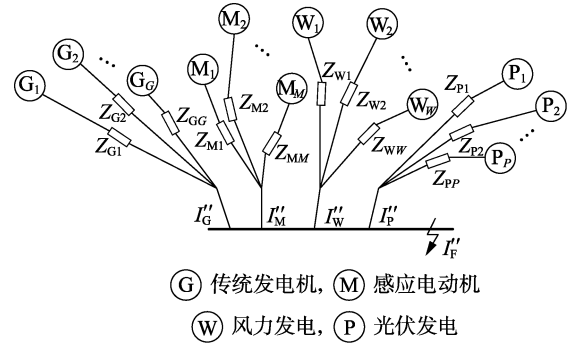


图2 提供短路电流的有源设备及其转移阻抗

Fig.2 Active devices providing short circuit current and their transfer impedances

### 1.2.2 MISCRI 的局限性分析

在仅关注短路电流幅值大小的应用中, 如设备机械强度设计、断路器遮断能力校验等, 不同有源设备提供的短路电流分量具有同一性, 采用式(4)叠加求和, 即可表征其综合效应。

采用式(1)或式(3)计算的传统 SCR, 是默认各所有源设备的动态无功特性及其对电压的支撑能力具有同一性。然而, 在有源设备多类型发展的条件下, 此默认前提将使采用传统 SCR 评估交流电网强度和表征电网动态电压支撑能力的局限性逐渐显现, 主要表现在如下2个方面。

一方面, 有源设备的动态无功具有无功电源和无功负荷2种特性, 例如常规发电机为无功电源, 感应电动机则为无功负荷。因此, 有源设备提供的动态无功的性质不同, 即动态电压支撑能力存在“质”的差异, 应予以区别对待。忽视该差异的 MISCRI 或 SCR, 即将有源设备统一地视为无功电源, 会导致 SCR 数值偏大, 并由此得出电网强度和电压支撑能力偏于乐观的冒进结论。

另一方面, 动态无功性质相同的有源设备, 存在原理、性能以及参数等不同之处, 例如无功电源中的基于励磁控制的常规发电机与基于变频器控制的新能源机组, 二者原理不同; 无功负荷中的大工业感应

电动机与水泵、民用综合电机主要电气参数不尽相同。因此,对应输出单位短路电流的有源设备,其提供的动态无功的大小不同,即动态电压支撑能力存在“量”的差异,应予以细化考察。忽视该差异的 MISC<sub>R</sub> 或 SCR,即将有源设备短路电流或短路容量按相同权系数叠加,会降低 SCR 计算精细程度,影响电网强度和电压支撑能力评估的精准性。

鉴于传统计算方法中 MISC<sub>R</sub> 和 SCR 存在局限性,因此需要综合考虑有源设备动态无功性质差异和动态无功大小差异,即有源设备“质”“量”差异,并在此基础上,定义一种新的 SCR 指标。

## 2 计及有源设备“质”“量”差异的 SCR

### 2.1 计及“质”“量”差异的通用 SCR

本文提出的一种计及不同有源设备“质”“量”差异的 MISC<sub>R</sub> 指标 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub>,如式(5)所示。

$$\text{MISC}_{\text{R}_{\text{CQQ}i}} = \sqrt{3} U_{\text{Ni}} \frac{I''_{\text{Gi}} + \sum_{e=1}^{E_S} \alpha_{ei} I''_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} \beta_{fi} I''_{\text{Lfi}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} = \frac{S_{\text{Gi}} + \sum_{e=1}^{E_S} \alpha_{ei} S_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} \beta_{fi} S_{\text{Lfi}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} \quad (5)$$

其中,  $I''_{\text{G}}$ 、 $I''_{\text{S}}$ 、 $I''_{\text{L}}$  和  $S_{\text{G}}$ 、 $S_{\text{S}}$ 、 $S_{\text{L}}$  分别为常规发电机、其他无功电源类、无功负荷类有源设备提供的短路电流和短路容量;  $E_{\text{S}}$ 、 $E_{\text{L}}$  分别为 2 类有源设备包括的类型总数,如无功电源中的风电、光伏等;  $\alpha$ 、 $\beta$  为现有源设备动态无功容量大小差异的权系数。

由式(5)可以看出,通过无功电源分量的加权叠加以及无功负荷分量的加权消去, MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 指标可计及有源设备对动态电压支撑能力“质”的和“量”的差异影响。

将有源设备划分为常规发电机及其他具备无功电源和无功负荷 2 类性质的设备后,短路电流和短路容量与其各分量之间的关系分别满足式(6)和式(7)。

$$I''_{\text{Gi}} = I''_{\text{Fi}} - \sum_{e=1}^{E_S} I''_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} I''_{\text{Lfi}} \quad (6)$$

$$S_{\text{Gi}} = S_{\text{i}} - \sum_{e=1}^{E_S} S_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} S_{\text{Lfi}} \quad (7)$$

考虑到实际工程中母线三相短路电流  $I''_{\text{Fi}}$  和短路容量  $S_{\text{i}}$  应用较多,为此将式(6)和(7)代入式(5),可进一步得到 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 的计算公式如式(8)所示。

$$\text{MISC}_{\text{R}_{\text{CQQ}i}} = \sqrt{3} U_{\text{Ni}} \frac{I''_{\text{Fi}} + \sum_{e=1}^{E_S} (\alpha_{ei} - 1) I''_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} (1 + \beta_{fi}) I''_{\text{Lfi}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} =$$

$$\frac{S_{\text{i}} + \sum_{e=1}^{E_S} (\alpha_{ei} - 1) S_{\text{Sei}} - \sum_{f=1}^{E_L} (1 + \beta_{fi}) S_{\text{Lfi}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} \quad (8)$$

结合式(1)和(8),定义计及有源设备差异的 SCR 修正系数  $K_{\text{CQQ}}$  如式(9)所示,则 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 与传统指标 MISC<sub>R</sub> 之间的关系如式(10)所示。对于 SCR 指标 SCR<sub>CQQ</sub>,可视为 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 的特殊情况,在式(8)中消去对应的累加分量  $\sigma_{ij} P_{\text{dj}}$  即可。

$$K_{\text{CQQ}i} = 1 + \sum_{e=1}^{E_S} (\alpha_{ei} - 1) \frac{I''_{\text{Sei}}}{I''_{\text{Fi}}} - \sum_{f=1}^{E_L} (1 + \beta_{fi}) \frac{I''_{\text{Lfi}}}{I''_{\text{Fi}}} = 1 + \sum_{e=1}^{E_S} (\alpha_{ei} - 1) \frac{S_{\text{Sei}}}{S_{\text{i}}} - \sum_{f=1}^{E_L} (1 + \beta_{fi}) \frac{S_{\text{Lfi}}}{S_{\text{i}}} \quad (9)$$

$$\text{MISC}_{\text{R}_{\text{CQQ}i}} = K_{\text{CQQ}i} \text{MISC}_{\text{R}i} \quad (10)$$

基于 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 的电网强度评价,仍沿用传统多直流馈入有效 SCR 评判逻辑:若 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> > 3.0,则交流电网为强系统;若 2.0 ≤ MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> ≤ 3.0,则为弱系统;若 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> < 2.0,则为极弱系统。

计及有源设备“质”“量”差异的新 SCR 与设备无功对换流母线电压灵敏度分析,对判定换流母线电压稳定性具有一致性。以提供感性动态无功的设备为例,其无功与换流母线电压间的灵敏度为负,对应恶化电压稳定性,对此减去其所提供的短路容量,新 SCR 指标减小亦可表征电压稳定性恶化。

### 2.2 仅考虑感应电动机负荷的 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 指标

交流电网受扰后的恢复过程中,直流逆变站呈现出的大容量无功负荷特性会使电压稳定问题更加突出。因此,直流馈入受端电网是交直流混联电网中重点关注的一类场景。

在直流馈入受端电网中,风电、光伏等新能源电源通常采用分布式发电、低电压等级并网的开发利用模式。由于与直流逆变站(落点于超高压、特高压交流电网)之间的电气距离较大,这些电源对换流母线短路电流影响较小,可忽略不计。因此,电网中的有源设备主要为常规发电机以及感应电动机。针对这一重要场景,考虑到有源设备均为旋转电机,取  $\beta = 1$ ,则对应式(8)和(9)所示的 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub>、 $K_{\text{CQQ}}$  可做简化,分别如式(11)和(12)所示。

$$\text{MISC}_{\text{R}_{\text{CQQ}i}} = \frac{S_{\text{i}} - 2S_{\text{Li}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} = \frac{2S_{\text{Gi}} - S_{\text{i}}}{P_{\text{di}} + \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_{ij} P_{\text{dj}}} \quad (11)$$

$$K_{\text{CQQ}i} = 1 - \frac{2S_{\text{Li}}}{S_{\text{i}}} = \frac{2S_{\text{Gi}}}{S_{\text{i}}} - 1 \quad (12)$$

## 3 MISC<sub>R</sub><sub>CQQ</sub> 计算流程

计及有源设备动态电压支撑能力“质”“量”差

异的多直流馈入短路比  $MISCR_{CQQ}$  计算流程如附录中图 A1 所示。图中,  $T_P$ 、 $T_L$  和  $T_S$  为用于累加求和的临时变量。面向直流馈入数量为  $N_d$  的系统, 针对第  $i$  回直流, 在计算其换流母线三相短路电流  $I''_{Fi}$  或三相短路容量  $S_i$  的基础上, 依次遍历除常规发电机之外的无功电源类和无功负荷类有源设备, 加权叠加或消去对应分量, 以计及其强化或弱化动态电压支撑能力的差异效果。

#### 4 $SCR_{CQQ}$ 和 $MISCR_{CQQ}$ 有效性验证

##### 4.1 多直流馈入受端系统

某电网规划方案下, 河南豫西、豫中地区将形成如图 3 所示的多直流馈入受端系统。豫西地区通过嘉和—汝州、洛东—郑州和马寺—巩义 3 条 500 kV 交流通道 5 回线与河南主网互联。豫西、豫中 2 回特高压直流的额定电压和额定送电功率均分别为  $\pm 800$  kV 和 8 000 MW。豫西地区负荷容量为 10 397 MW, 覆盖地域范围较小; 豫中地区负荷容量为 9 356 MW, 覆盖地域范围则相对较大。电网负荷模型采用恒阻抗与感应电动机组合的模型, 其中感应电动机参数采用实际电网运行方式校核计算中设定的参数, 得到定子电阻  $R_s = 0.02$  p.u.、定子电抗  $X_s = 0.18$  p.u., 转子电阻  $R_r = 0.02$  p.u.、转子电抗  $X_r = 0.12$  p.u., 激磁电抗  $X_m = 3.5$  p.u.。直流采用国际大电网提供的标准测试模型, 即 CIGRE 模型<sup>[26]</sup>。短路电流计算和电网大扰动暂态稳定仿真计算, 分别采用 BPA-SCCPC 和 BPA-SWNT 计算程序, 利用前者的计及和不计及“计及马达负荷”功能, 依据所得结果的差异, 可计算得到马达负荷所提供的短路电流分量。

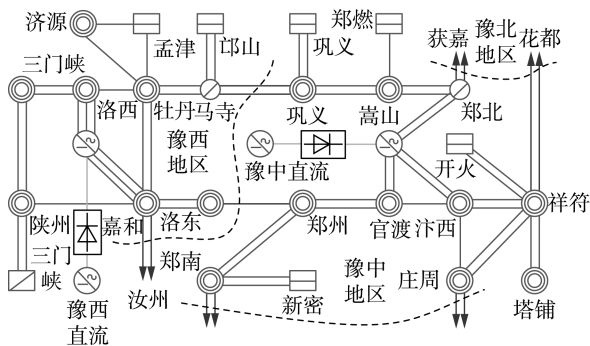


图3 多直流馈入受端系统

Fig.3 Multi-infeed HVDC receiving end system

##### 4.2 $SCR_{CQQ}$ 和 $MISCR_{CQQ}$ 及其有效性分析

###### 4.2.1 $SCR/SCR_{CQQ}$ 变化趋势

观察豫西、豫中地区感应电动机占各区域总负荷不同比例条件下, 豫西直流换流母线短路容量  $S$ 、 $S_G$  和  $S_L$ , 短路比  $SCR$ 、 $SCR_{CQQ}$  以及  $K_{CQQ}$  的变化情况。计算结果及其变化趋势分别如表 1 和图 4 所示。

表1 不同感应电动机占比下的计算结果

Table 1 Calculative results under different proportions of induction motor

| 占比/<br>% | $S$ /<br>(MV·A) | $S_G$ /<br>(MV·A) | $S_L$ /<br>(MV·A) | SCR  | $K_{CQQ}$ | $SCR_{CQQ}$ |
|----------|-----------------|-------------------|-------------------|------|-----------|-------------|
| 0        | 30 345          |                   | 0                 | 3.79 | 1         | 3.79        |
| 10       | 31 907          |                   | 1 562             | 3.99 | 0.902     | 3.60        |
| 20       | 33 441          |                   | 3 096             | 4.18 | 0.815     | 3.41        |
| 30       | 34 766          |                   | 4 421             | 4.34 | 0.746     | 3.24        |
| 40       | 35 912          | 30 345            | 5 567             | 4.48 | 0.690     | 3.10        |
| 50       | 36 910          |                   | 6 565             | 4.61 | 0.644     | 2.97        |
| 60       | 37 786          |                   | 7 441             | 4.72 | 0.606     | 2.86        |
| 70       | 38 562          |                   | 8 217             | 4.82 | 0.574     | 2.77        |

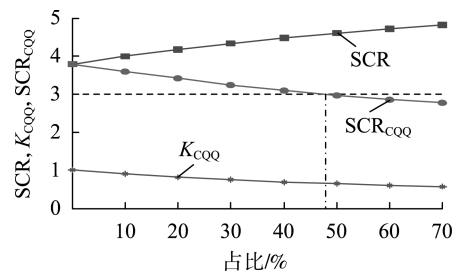


图4 不同感应电动机占比下的变化趋势

Fig.4 Variation tendency under different proportions of induction motor

由表 1 和图 4 可以看出, 随着感应电动机负荷比例提升, 豫西直流换流站母线的短路容量持续增加, 对应的  $SCR$  增大, 表征直流馈入电网的强度与电压支撑能力增强。与之相反, 计及感应电动机影响的  $SCR_{CQQ}$  则单调减小, 当感应电动机比例超过 48% 时,  $SCR_{CQQ}$  将小于 3.0, 表征交流电网为弱系统, 电压失稳威胁较大。由此可见, 2 种指标反映出的电网电压支撑能力的变化趋势截然相反。

###### 4.2.2 $MISCR/MISCR_{CQQ}$ 变化趋势

观察感应电动机不同负荷占比条件下, 豫西、豫中 2 回特高压直流的  $MISCR$ 、修正系数  $K_{CQQ}$  以及计及感应电动机负荷影响的短路比  $MISCR_{CQQ}$  的计算结果如表 2 所示, 其变化趋势如图 5 所示。

由表 2 和图 5 可看出, 豫西、豫中直流  $MISCR$  指标均大于 3.0, 且随感应电动机负荷比例提升单调增大, 表征多直流馈入电网强度和电压支撑能力持

表2 不同感应电动机占比下的计算结果

Table 2 Calculative results under different proportions of induction motor

| 占比/<br>% | $MISCR$ |      | $K_{CQQ}$ |       | $MISCR_{CQQ}$ |      |
|----------|---------|------|-----------|-------|---------------|------|
|          | 豫西      | 豫中   | 豫西        | 豫中    | 豫西            | 豫中   |
| 0        | 3.33    | 4.26 | 1         | 1     | 3.33          | 4.26 |
| 10       | 3.53    | 4.41 | 0.902     | 0.963 | 3.18          | 4.25 |
| 20       | 3.73    | 4.55 | 0.815     | 0.930 | 3.03          | 4.23 |
| 30       | 3.90    | 4.67 | 0.746     | 0.902 | 2.91          | 4.21 |
| 40       | 4.05    | 4.77 | 0.690     | 0.880 | 2.79          | 4.20 |
| 50       | 4.18    | 4.85 | 0.644     | 0.861 | 2.69          | 4.17 |
| 60       | 4.30    | 4.92 | 0.606     | 0.846 | 2.61          | 4.16 |
| 70       | 4.40    | 4.99 | 0.574     | 0.832 | 2.52          | 4.15 |

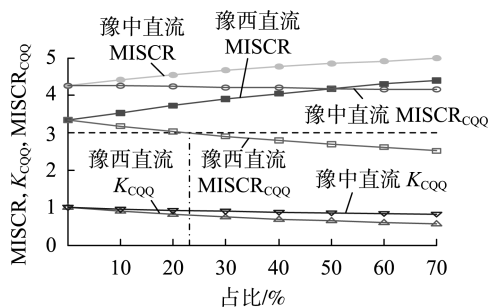


图 5 不同感应电动机占比下的变化趋势

Fig.5 Variation tendency under different proportions of induction motor

续增强。与之相反,计及感应电动机影响的双回直流  $MISCR_{cqq}$  则均呈单调减小趋势。其中,受豫西地区常规发电机少、负荷容量和密度大等因素的影响,豫西直流是多直流系统中的最为薄弱的环节,即其  $MISCR_{cqq}$  数值最小。当感应电动机比例大于 23% 后,豫西  $MISCR_{cqq}$  将小于 3.0,对应的多直流馈入系统即表征为弱系统。

#### 4.2.3 $SCR_{cqq}/MISCR_{cqq}$ 有效性验证

由计算方法可以看出,SCR 本质上是一种静态指标,基于的是网络静态电气参数和稳态运行参数。因此,SCR 应用于电网动态电压支撑能力评估的有效性,需结合既定评判逻辑下指标变化趋势与电网动态行为演化态势间的一致性予以验证。为此,针对图 3 所示的多直流馈入受端系统,对应 4.2.1 节所涉及的不同感应电动机负荷占比,仿真模拟嘉和—汝州双回线嘉和侧金属性三相接地短路故障,以验证短路比与动态行为间的一致性。

感应电动机不同占比下豫西换流母线电压大扰动恢复特性如图 6 所示(图中电压为标幺值)。综合图 6 以及表 1 和表 2 所示的 SCR 计算结果可以看出,感应电动机接入条件下,采用传统 SCR、MISCR 指标评价动态电压支撑能力已经失效,即利用指标增大判定电压支撑能力增强与仿真结果表现出的电网电压恢复特性恶化二者相悖。计及感应电动机弱化电压支撑能力的  $SCR_{cqq}$  和  $MISCR_{cqq}$ ,其数值单调减小判别出的电网强度或电压支撑能力弱化趋势与电网电压恢复特性的恶化态势二者相一致。因此,综合以上分析,本文提出的新指标是有效的。豫西站  $MISCR_{cqq}$  指标与故障清除后豫西母线电压恢复至 0.9 p.u. 所需恢复时间的对应关系如图 7 所示。可见指标大小能够定量表征受端交流电网的恢复能力。

此外,从图 6 和图 7 中可以看出,当感应电动机负荷比例超过 30% 时,对应  $MISCR_{cqq}$  将小于 3.0,此时电压恢复特性已有较为显著的恶化,恢复时间也明显增加,因此对于  $MISCR_{cqq}$  指标沿用传统 SCR 评判逻辑是合理的。

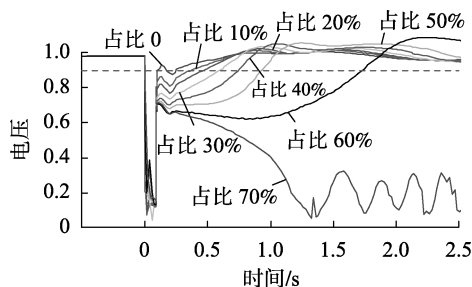
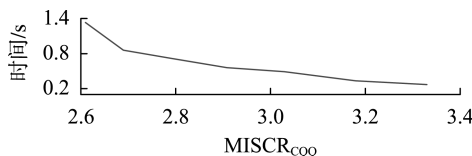


图 6 仿真结果

Fig.6 Simulative results

图 7  $MISCR_{cqq}$  与电压恢复时间之间的关系Fig.7 Relationship between  $MISCR_{cqq}$  and voltage recovery time

## 5 结论

a. SCR 是一种可用于评价电网动态电压支撑能力的定量指标。在有源设备多类型发展条件下,传统 SCR 已面临评价失效的问题。

b. 为保障评价的有效性,SCR 计算中应区别有源设备动态无功电源或动态无功负荷性质的不同(“质”的差异)以及有源设备动态无功容量大小的不同(“量”的差异)。

c. 本文提出了一种计及有源设备差异的新的 MISCR 指标  $MISCR_{cqq}$ 。多源设备接入的多直流馈入受端电网的大扰动时域仿真结果验证了  $MISCR_{cqq}$  的有效性,即  $MISCR_{cqq}$  数值大小的变化趋势与电网电压恢复特性的演化态势间具有一致性。

d. 区别不同有源设备的动态无功大小的差异(同在输出单位短路电流的条件下),并据此确定  $MISCR_{cqq}$  中对应分量的权系数,是本文后续需要深入开展的研究工作。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 马世英,宋云亭,申旭辉,等. 短路电流控制技术及应用[M]. 北京:中国电力出版社,2014:28-39.
- [2] 徐政,黄弘扬,周煜智,等. 描述交直流并列系统电网结构品质的 3 种宏观指标[J]. 中国电机工程学报,2013,33(4):1-7.  
XU Zheng, HUANG Hongyang, ZHOU Yuzhi, et al. Three macroscopic indexes for describing the quality of AC/DC hybrid power grid structures[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4):1-7.
- [3] 邵瑶,汤涌,郭小江,等. 多直流馈入华东受端电网暂态电压稳定性分析[J]. 电网技术,2011,35(12):50-55.  
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojia, et al. Transient voltage stability analysis of east China receiving-end power grid with multi-infeed HVDC transmission lines[J]. Power System Technology,

- 2011,35(12):50-55.
- [4] 杨冬,周勤勇,刘玉田.一种适用于多直流馈入系统的限流措施优化配置方法[J].电力自动化设备,2015,35(6):93-98,129.  
YANG Dong,ZHOU Qinyong,LIU Yutian. Optimal configuration of current-limiting measures for multiple DC infeed system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):93-98,129.
- [5] 沈郁,熊永新,姚伟,等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流输电受端接入方式的综合评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):195-202.  
SHEN Yu,XIONG Yongxin,YAO Wei,et al. Comprehensive evaluation for receiving end connection scheme of  $\pm 1100$  kV UHVDC power transmission[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):195-202.
- [6] 程斌杰,徐蔚,徐政. 基于多直流落点系统稳定性的电网静态分区方案选择方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):129-135.  
CHENG Binjie,XU Wei,XU Zheng. Static segmentation scheme section based on stability of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(12):129-135.
- [7] GENE K,HARRY S. Comparison of ANSI and IEC909 short-circuit current calculation procedures[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1993,29(3):625-630.
- [8] 尹建华,江道灼,韩祯祥. 电力系统故障分析的一种新型实用计算机分析算法及在 BPA 暂态程序中的实现[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):71-76.  
YIN Jianhua,JIANG Daozhuo,HAN Zhenxiang. New practical algorithm and its application in BPA for power system fault analysis[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(3):71-76.
- [9] 谢文,朱永强,崔文进. IEC60909 短路电流计算标准分析[J]. 电力建设,2005,26(2):23-25.  
XIE Wen,ZHU Yongqiang,CUI Wenjin. Analysis on short-circuit current calculation standard IEC60909[J]. Electric Power Construction,2005,26(2):23-25.
- [10] 姚淑玲,田华. 基于 BPA 和 PSASP 程序的短路电流计算对比[J]. 电力系统自动化,2011,35(14):112-115.  
YAO Shuling,TIAN Hua. A comparison between BPA and PSASP software programs for calculating short-circuit currents[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(14):112-115.
- [11] 刘楠,张彦涛,秦晓辉,等. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术,2012,36(8):187-192.  
LIU Nan,ZHANG Yantao,QIN Xiaohui,et al. Impact of load induction motor on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology,2012,36(8):187-192.
- [12] 尹建华. 考虑感应电动机负荷电磁暂态特性的系统短路电流计算方法[J]. 南方电网技术,2010,4(3):62-66.  
YIN Jianhua. A short circuit current calculation method in power system with consideration of the electromagnetic transient characteristics of induction-motor's load[J]. Southern Power System Technology,2010,4(3):62-66.
- [13] 苏常胜,李凤婷,晁勤,等. 异步风力发电机等值及其短路特性研究[J]. 电网技术,2011,35(3):177-182.  
SU Changsheng,LI Fengting,CHAO Qin,et al. Research on equivalent aggregation of asynchronous wind power generators and its short-circuit characteristics[J]. Power System Technology,2011,35(3):177-182.
- [14] 邢鲁华,陈青,吴长静,等. 含双馈风电机组的电力系统短路电流实用计算方法[J]. 电网技术,2013,37(4):1121-1127.  
XING Luhua,CHEN Qing,WU Changjing,et al. A practical method to calculate short-circuit current in power system connected with doubly fed induction generators[J]. Power System Technology,2013,37(4):1121-1127.
- [15] 潘文霞,杨刚,刘明洋,等. 考虑 Crowbar 电阻的双馈电机短路电流计算[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3629-3634.  
PAN Wenxia,YANG Gang,LIU Mingyang,et al. Calculation of short-circuit current of DFIG with the considering of Crowbar resistance[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(13):3629-3634.
- [16] 王铁柱,万磊,卜广全,等. 逆变侧交流系统三相短路时直流系统贡献短路电流的机理和计算方法[J]. 电网技术,2016,40(5):1313-1319.  
WANG Tiezhu,WAN Lei,BU Guangquan,et al. Mechanism and calculation method study of DC system contributed short-circuit current with three-phase short-circuit fault on inverter side[J]. Power System Technology,2016,40(5):1313-1319.
- [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] 郭小江,郭剑波,王成山. 考虑直流输电系统外特性影响的多直流馈入短路比实用计算方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2143-2151.  
GUO Xiaojiang,GUO Jianbo,WANG Chengshan. Practical calculation method for multi-infeed short circuit ratio influenced by characteristics for external characteristics of DC system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9):2143-2151.
- [19] 王鹏飞,张英敏,李兴源,等. 基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(6):74-78,85.  
WANG Pengfei,ZHANG Yingmin,LI Xingyuan,et al. Interaction analysis of AC/DC systems based on multi-infeed effective short circuit ratio[J]. Power System Protection and Control,2012,40(6):74-78,85.
- [20] 辛焕海,章枫,于洋,等. 多馈入直流系统广义短路比:定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):633-647.  
XIN Huanhai,ZHANG Feng,YU Yang,et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems:definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):633-647.
- [21] 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.
- [22] 杨欢欢,蔡泽祥,朱林,等. 直流系统无功动态特性及其对受端电网暂态电压稳定的影响[J]. 电力自动化设备,2017,37(10):86-92.  
YANG Huanhuan,CAI Zexiang,ZHU Lin,et al. Dynamic characteristic of HVDC reactive power and its influence on transient voltage stability of receiving-end power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(10):86-92.
- [23] 李妮,李兴源,冯明,等. 改善多馈入直流系统电压无功特性的直流控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):25-30.  
LI Ni,LI Xingyuan,FENG Ming,et al. DC control for improving

voltage and reactive power characteristics of multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 25-30.

- [24] 雷霄, 孙棚, 李新年, 等. 适应大容量直流入弱受端的直流极控系统优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(9): 205-209.

LEI Xiao, SUN Xu, LI Xinnian, et al. Optimization methods of pole control system for large-capacity HVDC accessing to weak receiving system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 205-209.

- [25] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析(上册)[M]. 3版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2008: 140-146.

- [26] 宋新立, 吴小辰, 刘文焯, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序中的新直流输电准稳态模型[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 62-67.

SONG Xinli, WU Xiaochen, LIU Wenzhuo, et al. New quasi-steady-state HVDC models for PSD-BPA power system transient stability simulation program[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 62-67.

#### 作者简介:



郑超

郑超(1977—),男,江西九江人,教授级高级工程师,博士,研究方向为电力系统稳定与控制、交直流系统分析、FACTS、新能源并网技术(E-mail: zhengch@epri.sgcc.com.cn);

吕思卓(1989—),男,山西大同人,工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制;

马世英(1969—),男,山东安丘人,教授级高级工程师,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统稳定与控制、交直流系统分析、源网协调技术、电力大数据技术;

高凯(1972—),男,辽宁沈阳人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统调度自动化;

张鑫(1981—),男,山东莱芜人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电力系统稳定与控制。

## DC short circuit ratio considering difference of “quality” and “quantity” for active device

ZHENG Chao<sup>1</sup>, LÜ Sizhuo<sup>1</sup>, MA Shiyang<sup>1</sup>, GAO Kai<sup>2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Grid Liaoning Province Electric Power Company, Shenyang 110006, China)

**Abstract:** A new index  $MISCR_{CQQ}$  for direct current short circuit ratio is proposed, which considers the difference of dynamic characteristics of active devices, that is, the difference of both “quality” and “quantity” for reactive power. The calculation process of  $MISCR_{CQQ}$  is also given. Simulative results on multi-HVDC infeed system with large capacity induction motor access show that the magnitude of  $MISCR_{CQQ}$  exhibits a same changing trend as the dynamic voltage support capability of power grid. Therefore,  $MISCR_{CQQ}$  can effectively solve the evaluation failure problem of traditional short circuit ratio under multi-source environment.

**Key words:** short circuit ratio; power grid strength; dynamic voltage support; active device; diversification; characteristic difference

(上接第129页 continued from page 129)

## Two-stage real-time energy management mechanism and optimization strategy for EV charging area/station

LIU Qihui<sup>1</sup>, ZHANG Yibing<sup>1</sup>, WEI Jingfei<sup>2</sup>, HONG Chenwei<sup>1</sup>, PANG Fei<sup>1</sup>, ZHOU Qiang<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Materials Company, Beijing 100120, China;

3. Qingdao TGOOD Electric Co., Ltd., Qingdao 266104, China)

**Abstract:** A large number of electric vehicles will be integrated into the power system in the promising future. In this case, it is more or less unrealistic to directly dispatch each electric vehicle for orderly charging. A more realistic plan is to manage those electric vehicles in different levels and zones in a decentralized basis. In this regard, an EV charging layered energy management architecture including power system dispatching center, Area-EMS (Area Energy Manage System) and  $\mu$ -EMS (fine-tuning Energy Management System) is proposed. The function of each layer and the operation scheme of the layered management architecture are introduced in detail. A two-stage real-time energy management strategy is designed for Area-EMS and  $\mu$ -EMS in charge of agents respectively. The strategy can satisfy the charging needs of electric vehicles and ensure economic benefits. Moreover, this strategy is adaptive to different power grid coupling modes, and can improve load peak-valley characteristics of regional power grid. Simulation examples are conducted to verify the effectiveness and practicability of the proposed layered architecture and real-time energy management strategy.

**Key words:** electric vehicles; hierarchical architecture; energy management; economic benefit; peak-valley difference

## 附 录

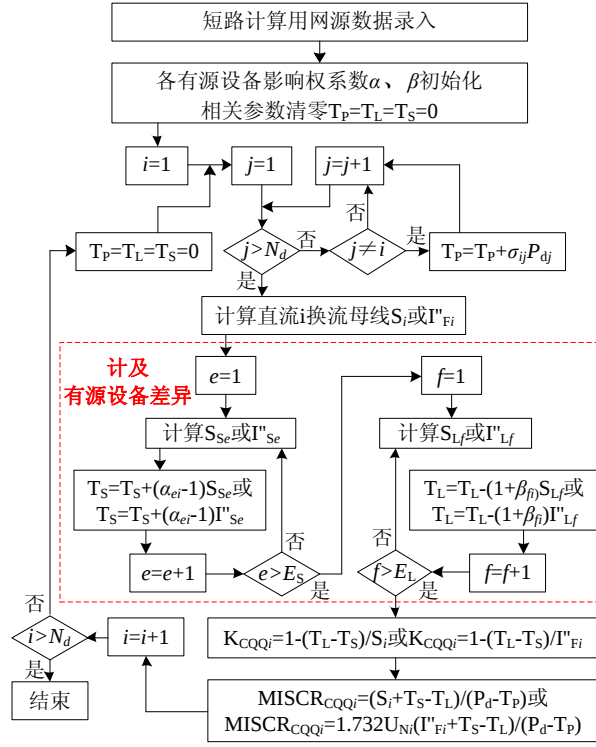


图 A1 MISCR<sub>CQQ</sub> 计算流程

Fig.A1 Calculation flowchart of MISCR<sub>CQQ</sub>