

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.014

# 考虑设备运行状态的频率和电压紧急调控在线预决策

张建新<sup>1</sup>, 吴峰<sup>2</sup>, 黄磊<sup>1</sup>, 鲍颜红<sup>2</sup>, 徐伟<sup>2</sup>, 徐光虎<sup>1</sup>, 杨君军<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510530;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 常规机组被特高压直流和大规模新能源替代导致电网面临严重的频率和电压安全稳定风险, 而及时有效的故障后紧急调控可以有效阻止大停电事故的发生。文中提出考虑设备实际运行状态的频率和电压紧急调控在线预决策方法, 考虑故障后系统保护、机组一次调频、自动发电控制和自动电压控制等装置动作对节点注入的影响, 自动识别故障后准稳态方式, 构建以综合控制代价最小为目标的频率和电压预决策模型; 通过措施枚举组合形成校核方案, 并基于措施调整量快速估算实现校核方案筛选; 兼顾频率和电压安全问题进行预决策策略迭代搜索, 给出具体设备和控制量, 实际故障发生后通过匹配故障和故障后问题进行紧急控制, 降低电网事故风险, 采用实际电网算例验证了该方法的有效性。

**关键词:** 频率和电压安全稳定; 系统保护; 事故预案; 紧急调控; 在线预决策

**中图分类号:** TM76

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2021)02-0101-06

## 0 引言

随着我国特高压交直流电网的建设, 目前已初步形成特高压交直流、多直流混联格局。以华东电网为例, 2019年华东跨区直流总容量约占华东汛期一般低谷负荷的46%, 负荷规模大、区外受电占比高, 常规机组大量被替代导致电网转动惯量下降, 频率和电压安全风险突出<sup>[1-3]</sup>。

华东电网已建成频率协控系统, 即系统保护, 提高电网整体频率稳定水平。并通过制定事故预案, 即紧急调控策略, 应对故障过渡到准稳态后可能出现的过载、电压、频率安全问题。但离线事故预案基于较为恶劣的典型方式制定, 经济性不足, 也无法计及发电机、直流、容抗器等可控设备实时运行状态, 预想的故障后准稳态方式与实际差别较大, 且具体控制量需要调度运行人员根据电网实际状态和运行经验进一步确定。此外, 间歇性新能源大规模接入和电力市场逐步推进使得电网运行方式与离线典型方式偏差日益增大<sup>[4-5]</sup>, 离线事故预案难以有效保障交直流电网的安全运行<sup>[6-8]</sup>。

目前, 在线方式下已初步实现了电压安全问题紧急调控预决策。文献[10]提出“事前决策、事后匹配”的紧急调控方法, 决策过程未考虑电网频率越限, 也未考虑同时影响电压、频率的直流功率调制、减负荷等措施。文献[11]提出基于启发式的多

类安全问题预防控制决策方法, 但忽略了有功措施对交流电压、无功措施对系统潮流的影响, 也未计及系统保护装置实际运行状态, 优化结果存在偏差。文献[12]建立考虑频率特性的故障后潮流模型, 系统的功率缺额由机组和负荷的一次调节作用共同承担, 但未考虑无功调节措施, 生成的稳态方式不够准确。紧急调控实时决策能够为调度运行人员提供校正控制策略<sup>[13]</sup>, 但故障后电网处于动态过程且校正控制决策计算耗时较长, 并不能保证策略的准确可靠<sup>[14-15]</sup>。

为弥补离线事故预案制定方式与故障发生时刻方式差异导致的预案欠控或失配风险, 文中考虑系统保护、机组一次调频、自动发电控制(automatic generation control, AGC)和自动电压控制(automatic voltage control, AVC)等装置动作对实际运行电网节点注入的影响, 计及系统保护当值策略识别故障后准稳态方式, 构建以综合控制代价最小为目标的频率和电压协调决策模型。通过有功、无功多类措施枚举组合形成校核方案, 并基于措施调整量快速估算实现校核方案筛选, 兼顾频率和电压安全问题进行预决策策略迭代搜索, 提升电网抵御严重故障事故风险的能力。

## 1 在线预决策基本思路

频率和电压紧急调控在线预决策可解决由暂态过程平息过渡到准稳态后出现的稳态频率越限或电压越限问题<sup>[16-17]</sup>。其首先获取状态估计、气象环境等多源数据生成电网运行方式和预想故障集,

收稿日期: 2020-10-25; 修回日期: 2020-12-09

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目“电网限制短路电流运行方式在线智能决策控制系统研究”

计及设备运行状态进行系统保护当值策略识别;然后,基于交直流设备详细模型进行暂态时域仿真,根据节点电压和频率波动情况判断系统是否达到准稳态,并根据节点注入量自动生成稳态运行方式,通过故障后电压、频率安全裕度计算识别需要在线预决策的故障集。考虑到在线计算时效性的要求,利用方案枚举组合、集群并行迭代的求解策略,进行频率和电压紧急调控预决策。紧急调控在线预决策基本思路如图1所示。

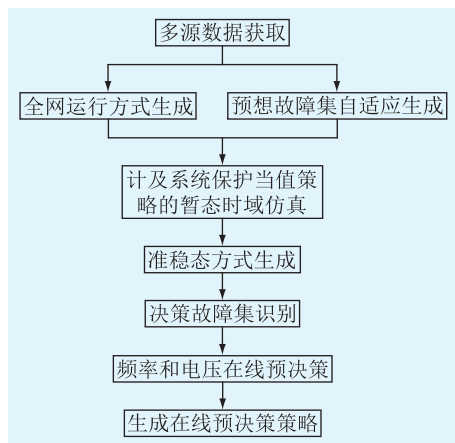


图1 紧急调控在线预决策

Fig.1 Online pre-decision for emergency regulation

紧急调控在线预决策的关键问题之一是事故后电网准稳态方式生成的准确性。因此仿真中需要基于电网设备实时运行状态,准确模拟安控、系统保护、发电机一次调频、AGC和AVC等自动装置动作,获取故障后各节点注入量和控制量,生成准确的事故后电网运行方式。此外,在线预决策需要快速搜索同时满足电压和频率安全要求的控制措施,对于交直流混联电网,有功和无功措施不能完全解耦,须要以综合控制代价最小为目标,迭代搜索同时满足电压、频率等多类安全稳定约束的控制策略,克服离线预案仅能给出处置要点的弊端。

## 2 计及设备状态的准稳态方式生成

为获取准确的电网故障后运行方式,需要计及设备实际运行状态识别系统保护<sup>[18-20]</sup>、机组一次调频等动作。设备实际运行状态指系统保护或安控装置、常规机组、容抗器等设备的实时运行状态,包括投停状态、实时出力等。准稳态指故障发生后在设定的 $\Delta t$ 时间内各母线频率波动不超过 $\Delta f$ (通常设定为0.01 Hz),同时各母线电压波动幅度不超过 $\Delta u$ (通常设定为0.05 kV)的运行状态。

### 2.1 系统保护当值策略模拟

系统保护策略模型包括:故障约束、方式约束、

潮流约束、控制约束、执行约束、措施约束、控制策略表达式、执行策略表达式以及优先级表达式。需采集的设备运行状态包括:电网一次设备的投停状态、系统保护装置及其压板的投退状态、可控设备的有功功率、电流以及当前处于发电状态还是抽水蓄能状态等。

根据电网故障前运行方式和预想故障,对系统保护策略进行在线分析和转化,将策略分配到相应控制子站、执行站执行或在本地执行,进而正确模拟系统保护的采取措施,为准确获取节点注入变化和进行预决策策略计算奠定基础<sup>[21-24]</sup>。

### 2.2 机组一次调频模拟

故障后节点有功注入量变化与发电机一次调频参数、负荷的静态频率特性和功率不平衡量等有关。

首先,针对特高压直流所连接的交流电网,根据以检测到交直流故障为启动判据的安控和系统保护控制策略,运行状态,以及电网运行方式的实时信息,确定故障当值控制措施,计算各交流电网因故障和当值措施实施所引起的有功功率不平衡量 $\Delta P_{dis}$ 。

其次,计算当值措施和发电机一次调频动作后发电机和负荷节点的稳态有功潮流,具体步骤如下。

步骤一:计算各发电机一次调频限幅对应的频率变化量 $\Delta f_i$ 。

$$\Delta f_i = \min(|P_{GN_i} - P_{G_i}|, \sigma_{G_i} P_{GN_i}) / K_{G_i} \quad i = 1, \dots, N_G \quad (1)$$

式中: $P_{GN_i}$ ,  $P_{G_i}$ ,  $\sigma_{G_i}$ ,  $K_{G_i}$ 分别为发电机 $i$ 的有功功率上、下限,故障前有功出力,一次调频限幅和调差系数; $N_G$ 为发电机数目。

步骤二:将各发电机按 $|\Delta f_i|$ 由小到大排序,排序后满足 $|\Delta f_{i-1}| \leq |\Delta f_i|$ 。置 $k = 1$ ,  $\Delta f_0 = 0$ ,  $\Delta P_s = 0$ ,  $\Delta P_s$ 为发电机有功功率调整量之和。

步骤三:计算发电机 $k$ 参与一次调频时系统的调频系数 $K_{S_k}$ 。

$$K_{S_k} = \sum_{p=k}^{N_G} K_{G_p} + \sum_{j=1}^{N_S} K_{D_j} \quad (2)$$

式中: $K_{D_j}$ 为节点 $j$ 负荷的有功静态频率特性系数; $N_S$ 为负荷数目。

步骤四:计算频率偏差由 $\Delta f_{k-1}$ 变化到 $\Delta f_k$ 对应的有功功率调整量 $\Delta P_{S_k}$ 。

$$\Delta P_{S_k} = K_{S_k} (\Delta f_k - \Delta f_{k-1}) \quad (3)$$

更新 $\Delta P_s = \Delta P_s + \Delta P_{S_k}$ 。

步骤五:如果 $\Delta P_s < \Delta P_{dis}$ ,则置 $k = k + 1$ ,返回步骤三;否则,计算系统有功功率缺额 $\Delta P_{dis}$ 对应的

频率偏差  $\Delta f_{\text{dis}}$ 。

$$\Delta f_{\text{dis}} = \Delta f_k - (\Delta P_S - \Delta P_{\text{dis}})/K_{S_k} \quad (4)$$

步骤六:计算系统频率偏差为  $\Delta f_{\text{dis}}$  时各发电机和负荷分摊的有功功率。如果  $\Delta f_{\text{dis}} < \Delta f_i$ , 则发电机  $i$  分摊的有功功率  $\Delta P_{G_i}$  为:

$$\Delta P_{G_i} = K_{G_i} \Delta f_{\text{dis}} \quad (5)$$

否则,发电机  $i$  分摊的有功功率  $\Delta P_{G_i}$  为:

$$\Delta P_{G_i} = \min(|P_{G_{N_i}} - P_{G_i}|, \sigma_{G_i} P_{G_{N_i}}) \quad (6)$$

负荷  $j$  分摊的有功功率为:

$$\Delta P_{D_j} = K_{D_j} \Delta f_{\text{dis}} \quad (7)$$

### 2.3 无功电压控制策略模拟

基于故障后有功功率和无功功率计算电网中枢母线电压,故障后中枢母线电压未越限时,该母线电压无需修正。当中枢母线电压越限时,获取越限中枢母线所在分区中的控制策略、运行状态、可调整空间信息。通过归一化处理构建当前计算方式数据下 AVC 电压控制优化模型。其目标函数如下:

$$J_1 = \min(\omega_1 J_{1,1} + \omega_2 J_{1,2}) \quad (8)$$

式中:  $\omega_1, \omega_2$  均为权重因子;  $J_{1,1}, J_{1,2}$  分别为电压偏差目标和无功调整目标。

选用机组无功功率、可投切电容器和变压器分接头作为控制变量,以节点电压幅值作为状态变量,优化计算时必须满足状态变量约束、控制变量约束和潮流计算约束等约束条件。

## 3 频率和电压预决策策略迭代求解

对于计及系统保护、调频调压策略后仍然存在的电压、频率越限等安全问题,以控制代价最小为目标,通过频率、电压迭代求解,搜索紧急调控预决策策略,提供具体控制设备和控制量。

### 3.1 目标函数

预决策目标是总控制代价最小,式(9)为决策目标函数。主要考虑的安全约束有稳态频率越限、设备过载/断面越限和稳态电压越限。

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{n_i} (C_{GP,i} |\Delta P_{G_i}| + C_{GQ,i} |\Delta Q_{G_i}|) + \sum_{j=1}^{n_j} (C_{LP,j} |\Delta P_{L,j}| + C_{LQ,j} |\Delta Q_{L,j}|) + \sum_{k=1}^{n_k} (C_{D,k} |\Delta P_{D,k}|) + \sum_{l=1}^{n_l} (C_{X,l} |\Delta Q_{X,l}|) \right\} \quad (9)$$

式中:  $n_i$  为发电机可控措施数目;  $C_{GP,i}, \Delta P_{G_i}$  分别为第  $i$  个发电机单位有功调整代价和发电机有功变化量;  $C_{GQ,i}, \Delta Q_{G_i}$  分别为第  $i$  个发电机单位无功调整代价和发电机无功变化量;  $n_j$  为负荷可控措施总

数;  $C_{LP,j}, \Delta P_{L,j}$  分别为第  $j$  个负荷单位有功调整代价和负荷有功变化量;  $C_{LQ,j}, \Delta Q_{L,j}$  分别为第  $j$  个负荷单位无功调整代价和负荷无功变化量;  $n_k$  为直流可控措施总数;  $C_{D,k}, \Delta P_{D,k}$  分别为第  $k$  个直流单位有功调整代价和直流有功变化量;  $n_l$  为容抗器可控措施总数;  $C_{X,l}, \Delta Q_{X,l}$  分别为第  $l$  个容抗器无功调整代价和容抗器无功变化量。

约束条件包括设备和断面有功限额、母线电压安全上下限、系统频率安全上下限。

### 3.2 措施控制性能指标计算

对于实际大电网而言,频率和电压安全稳定问题具有高维、强时变、强非线性的本质,基于性能指标的启发式方法易于满足实际应用中对于计算方法适应性和计算速度的需求。

针对频率跌落安全稳定的发电机有功调整措施控制性能指标计算方法如下,频率上升安全稳定以及直流有功调整、负荷有功调整计算方法与之类似。

$$Y_{\text{gfd}} = \frac{1}{J_1} \sum_{j_1=1}^{J_1} [(1 - \eta_{\text{fd},j_1})^k y_{\text{gfd},j_1}] / C_g \quad (10)$$

式中:  $J_1$  为频率跌落安全薄弱集中关键节点/发电机数;  $\eta_{\text{fd},j_1}$  为第  $j_1$  个关键节点/发电机的频率跌落安全裕度;  $(1 - \eta_{\text{fd},j_1})^k$  为  $y_{\text{gfd},j_1}$  的权重系数,  $k$  为设定的大于 1 的参数,该参数用以调节裕度作为权重系数的大小,  $k$  值大表明排序靠前的措施优先解决裕度较低的节点,  $k$  值小则表明排序靠前的措施需兼顾更多的不安全节点,  $y_{\text{gfd},j_1}$  为发电机所连接的节点与第  $j_1$  个关键节点/发电机节点之间电气距离的倒数,措施距离频率薄弱节点电气距离越近,表明该措施越有效;  $C_g$  为发电机单位有功功率控制代价。式(10)中频率薄弱节点指频率跌落安全裕度小于设定阈值值的节点(阈值值一般设置为 0)。电压控制措施性能指标计算方法与频率类似。

### 3.3 策略在线搜索

基于频率和电压安全稳定问题的特点和影响范围,按照频率、电压安全稳定问题分类优先原则进行优化决策。在线计算通常利用集群并行计算方法提升计算效率,流程如图 2 所示。为减少枚举组合方案数目,需对枚举方案进行筛选:若存在频率安全问题,则需根据  $K$  系数估算频率安全问题,预估调整量  $P_{\text{re}}$ ,估算调整量大于设定阈值(通常为 2 000 MW)时,将排序靠前的  $N$  个措施调整至上限,仅对接近并超出估算量的  $M$  个措施进行分档枚举和组合,从而缩小校核方案数目;否则,若仅存在电压安全问题,则无需计算预估调整量,所有措施

均纳入后续分档枚举和组合。

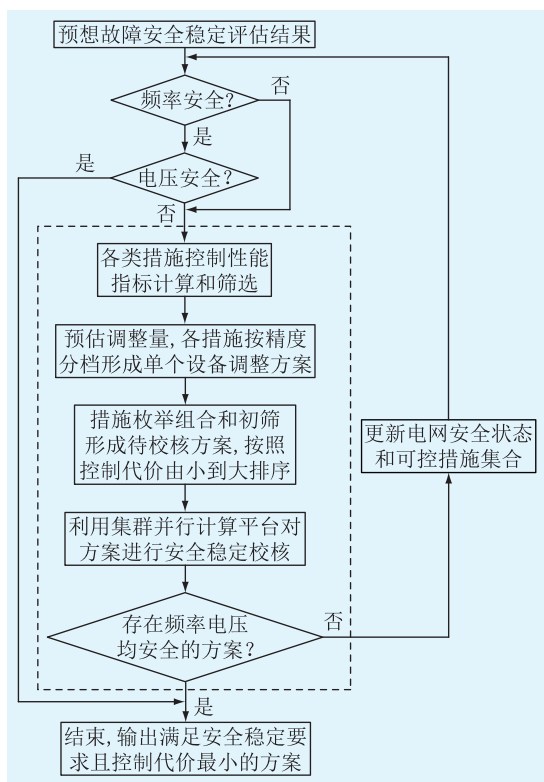


图2 频率和电压紧急调控在线预决策方法

Fig.2 Online pre-decision method for emergency regulation of frequency and voltage

需要说明的是,对于故障后可能出现的设备过载安全问题,可在频率和电压决策的基础上基于发电机措施灵敏度进行优化决策。

## 4 算例验证

### 4.1 电网运行方式简介

采用华东电网 2019-08-18 断面时刻数据进行算例验证。该方式下,宾金直流双极输送功率 5 379 MW,复奉直流双极输送功率 5 353 MW。预想宾金+复奉两回直流双极闭锁故障,根据系统保护实时运行状态监测信息识别当值控制策略,抽蓄机组全部为发电状态,切负荷装置通信异常,直流紧急提升 1 562 MW,故障后,系统稳态频率 49.80 Hz。其网架结构示意图如图 3 所示。表 1 为故障后电压和频率越限信息。

### 4.2 频率紧急控制决策

根据式(5)计算发电机措施控制性能指标,性能指标排序靠前的 8 台机组指标计算结果见表 2。

系统频率调节  $K$  系数按照 3 800 MW/0.1 Hz 考虑,估算调整量  $P_{re}$  为 5 700 MW。因直流已无可调空间,因此仅需对发电机措施进行枚举组合。根据 3.3 节方法计算,可得  $N=37, M=4, \Delta P_c$  取 50 MW。

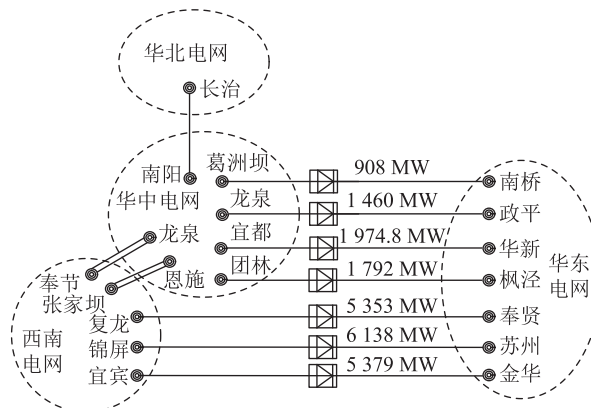


图3 网架结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of power grid

表1 电压和频率越限信息

Table 1 Voltage and frequency limit information

监视元件	元件类型	目标值	准稳态潮流下数值
仁和 500 kV II 母线	母线	(510 kV, 540 kV)	508.44 kV
金华 500 kV I 母线	母线	(49.95 Hz, 50.05 Hz)	49.80 Hz

表2 措施控制性能指标

Table 2 Performance index of measures control

序号	机组	可调量/MW	单位代价/(万元·MW <sup>-1</sup> )	指标
1	桐柏 G1	120.2	0.11	9.09
2	桐柏 G4	119.4	0.11	9.09
3	天荒坪 G2	90.1	0.12	8.33
4	天荒坪 G3	90.0	0.12	8.33
5	天荒坪 G4	90.0	0.12	8.33
6	天荒坪 G6	88.9	0.12	8.33
7	富春江 G1	179.6	0.08	7.69
8	富春江 G2	181.2	0.08	7.69

表 3 为估算量附近的 6 个调整方案,方案 4 调整量为 6 002.8 MW,虽然大于方案 3 的 5 990.1 MW,但由于发电机控制代价较小,其总代价小于方案 3,满足目标函数和约束条件。因此,选取方案 4 作为频率预决策措施,即通过增加机组出力约 6 000 MW 将系统频率恢复至 49.95 Hz。

表3 不同控制方案详细信息

Table 3 Details of different control schemes

方案号	调整量/MW	总代价/万元	频率安全裕度/%
1	5 678.6	602.5	-2.71
2	5 812.5	631.7	-1.21
3	5 990.1	672.1	0.69
4	6 002.8	642.7	1.69
5	6 090.5	659.9	2.35
6	6 240.4	681.4	3.49

### 4.3 电压紧急控制决策

在频率预决策基础上进行电压预决策,频率策略实施后浙江仁和站 500 kV II 母线稳态电压为 509.12 kV(限值设置为 510 kV),计算电压控制性能指标,结果如表 4 所示,无功控制代价均设置为 0.01 万元/Mvar,共筛选出 4 个有效措施。对措施进行枚举组合共形成 16 个待校核方案,表 5 列出其中 4 个方案的校核结果,可知方案 3 满足安全约束且总代价最小。因此,退仁和 1 号和 2 号电抗、投乔司 4 号电容解决电压越下限问题,共调整无功功率 170 Mvar,经校核,控制后仁和 500 kV 母线电压升至 512.19 kV,满足事故后电压控制要求,频率和电压紧急调控预决策策略搜索结束。

表 4 措施控制性能指标

Table 4 Performance index of measures control

序号	容抗器	调整方向	调整量/MW	指标
1	仁和 1 号电抗	退	+60	98.18
2	仁和 2 号电抗	退	+50	98.18
3	乔司 3 号电抗	退	+45	92.56
4	乔司 4 号电容	投	+60	92.56

表 5 不同控制方案详细信息

Table 5 Details of different control schemes

方案号	组合	调整量/ MW	总代价/ 万元	电压安全 裕度/%
1	1 号/2 号/3 号	155	1.55	-7.74
2	1 号/3 号/4 号	165	1.65	-1.79
3	1 号/2 号/4 号	170	1.7	1.19
4	1 号/2 号/3 号/4 号	215	2.15	21.69

## 5 结语

为了弥补目前调度运行人员采用基于离线典型方式制定事故预案时面临的方式适应性差、经济性不佳以及仅能给出处置要点的不足,文中提出了考虑设备实际运行状态的频率和电压紧急调控在线预决策方法。计及系统保护、机组一、二次调频等设备实际运行状态,在线准确识别故障后准稳态运行方式,构建以综合控制代价最小为目标的频率和电压协调决策模型。通过有功、无功多类措施枚举组合形成校核方案,兼顾频率和电压安全问题进行预决策策略迭代搜索,实际故障发生后通过匹配故障和故障后问题实现紧急调控,提升电网抵御严重故障事故风险的能力。

后续将融合人工智能技术,探索智能化的在线紧急调控决策方法。

本文得到南瑞集团有限公司科技项目“交直流

混联电网多时态计划快速校核与协同决策关键技术研究”资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 陈国平,李明节,许涛. 特高压交直流电网系统保护及其关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(22):2-10.  
CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao. System protection and its key technologies of UHV AC and DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22):2-10.
- [2] 陈国平,王德林,裘愉涛,等. 继电保护面临的挑战与展望[J]. 电力系统自动化,2017,41(16):1-11,26.  
CHEN Guoping, WANG Delin, QIU Yutao, et al. Challenges and development prospects of relay protection technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16):1-11, 26.
- [3] 郑超,马世英,申旭辉,等. 强直弱交的定义、内涵与形式及其应对措施[J]. 电网技术,2017,41(8):2491-2498.  
ZHENG Chao, MA Shiyong, SHEN Xuhui, et al. Definition, connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(8):2491-2498.
- [4] 严剑峰,于之虹,田芳,等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):87-93.  
YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34):87-93.
- [5] 蔡斌,吴素农,王诗明,等. 电网在线安全稳定分析和预警系统[J]. 电网技术,2007,31(2):36-41.  
CAI Bin, WU Sunong, WANG Shiming, et al. Power grid on-line security and stability analysis and forewarning system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2):36-41.
- [6] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等. 互联网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):1-4,36.  
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7):1-4, 36.
- [7] 汤涌,王英涛,田芳,等. 大电网安全分析、预警及控制系统的研发[J]. 电网技术,2012,36(7):1-11.  
TANG Yong, WANG Yingtao, TIAN Fang, et al. Research and development of stability analysis, early-warning and control system for huge power grids[J]. Power System Technology, 2012, 36(7):1-11.
- [8] 石辉,张思远. 省级电网静态安全在线辅助决策优化建模[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):98-102.  
SHI Hui, ZHANG Siyuan. Optimization modeling of static security online decision support for provincial power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20):98-102.
- [9] 鲍颜红,徐泰山,周华,等. 一种安全稳定紧急调控在线预决策方法[J]. 中国电力,2019,52(8):91-97.  
BAO Yanhong, XU Taishan, ZHOU Hua, et al. An online pre-decision method for security and stability emergency regulation[J]. Electric Power, 2019, 52(8):91-97.

- [10] 鲍颜红,冯长有,徐泰山,等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化,2015,39(1):104-110.  
BAO Yanhong,FENG Changyou,XU Taishan,et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(1):104-110.
- [11] 方勇杰,鲍颜红,徐伟,等. 电力系统安全稳定预防控制在计算方法的评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):199-207.  
FANG Yongjie,BAO Yanhong,XU Wei,et al. A review of on-line calculation methods of preventive control for power system security and stability [J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(11):199-207.
- [12] 颜伟,毛艳丽,王聪,等. 考虑频率特性和断面传输有功功率约束的潮流模型[J]. 电网技术,2015,39(1):236-241.  
YAN Wei,MAO Yanli,WANG Cong,et al. A power flow model considering frequency characteristic and constraint of active power transmitted via Tie line[J]. Power System Technology,2015,39(1):236-241.
- [13] 方勇杰,鲍颜红,徐泰山,等. 人工紧急调控与自动紧急控制协同防御[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):6-11.  
FANG Yongjie,BAO Yanhong,XU Taishan,et al. Coordinated prevention based on manual and automatic emergency control [J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):6-11.
- [14] 姚峰,张保会,周德才,等. 输电断面有功安全性保护及其快速算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):31-36.  
YAO Feng,ZHANG Baohui,ZHOU Decai,et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(13):31-36.
- [15] 秦晓辉,毕天姝,杨奇逊. 基于WAMS的电力系统机电暂态过程动态状态估计[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):19-25.  
QIN Xiaohui,BI Tianshu,YANG Qixun. Dynamic state estimator based on WAMS during power system transient process [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(7):19-25.
- [16] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids [J]. Power System Technology,2016,40(4):985-991.
- [17] 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.
- [18] 刘振亚. 中国特高压交流输电技术创新[J]. 电网技术,2013,37(3):567-574.  
LIU Zhenya. Innovation of UHVAC transmission technology in China [J]. Power System Technology,2013,37(3):567-574.
- [19] 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):2513-2522.  
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):2513-2522.
- [20] 董新洲,汤涌,卜广全,等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.  
DONG Xinzhou,TANG Yong,BU Guangquan,et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid operation [J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(11):3107-3119.
- [21] 王胜明,徐泰山,陈刚,等. 电网安全稳定控制系统当值策略可实施评估方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):126-133.  
WANG Shengming,XU Taishan,CHEN Gang,et al. Practicality assessment method of duty strategy for security and stability control system in power grid [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(24):126-133.
- [22] 郭琦,朱益华,常东旭,等. 电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):152-159.  
GUO Qi,ZHU Yihua,CHANG Dongxu,et al. Remote test method for security and stability control system of power grid and its engineering application [J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(1):152-159.
- [23] 彭云豪,董希建,周海强,等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(13):123-131.  
PENG Yunhao,DONG Xijian,ZHOU Haiqiang,et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system [J]. Power System Protection and Control,2020,48(13):123-131.
- [24] 张正卫,陈得治,卜广全,等. 多直流馈入的特高压环网安全稳定控制措施研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(19):46-53.  
ZHANG Zhengwei,CHEN Dezhi,BU Guangquan,et al. Research on safety and stability control measures of UHV loop network with multiple DC feeding [J]. Power System Protection and Control,2019,47(19):46-53.

作者简介:



张建新

张建新(1984),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统稳定分析与风险管理相关工作;

吴峰(1986),男,硕士,高级工程师,从事电网安全稳定控制技术相关工作(E-mail:wufeng@sgepri.sgcc.com.cn);

黄磊(1987),男,博士,高级工程师,从事电网安全稳定分析与控制技术相关工作。

## Decision making method for energy-intensive enterprise in consuming curtailed wind power

ZHU Dandan, ZHAO Jingbo, LI Qiang, ZHOU Qian, LIU Jiankun

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Energy-intensive enterprises have great potential in consuming curtailed wind power. While there are few decision making methods to support the regulation capacity or intended regulation curve report of enterprises. Thus, on the basis of benefit analysis of energy-intensive enterprise taking part of the regulation, a decision making model which is intended to maximize both the benefit of involved energy-intensive enterprise and the consumption of curtailed wind power is proposed. Besides, the decision making method for the energy-intensive enterprise is put forward and NSGA-II is employed for calculation in the model. A proper compromised solution is picked with application of additional constraints and satisfaction index. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through case analysis.

**Keywords:** wind power consumption; energy-intensive enterprise; benefit analysis; load-source coordination; decision making of enterprises

(编辑 吴楠)

(上接第 106 页)

## An online pre-decision method for frequency and voltage emergency regulation considering running condition of equipment

ZHANG Jianxin<sup>1</sup>, WU Feng<sup>2</sup>, HUANG Lei<sup>1</sup>, BAO Yanhong<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, XU Guanghu<sup>1</sup>, YANG Junjun<sup>2</sup>

(1. Power Dispatch Control Center of China Southern Power Grid Co.Ltd., Guangzhou 510530, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co.Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** There are risks of frequency and voltage security and stability due to the on-going replacement of conventional synchronous power plants by intermittent generation and DC transmission. Prompt and effective emergency regulation after faults can prevent blackouts. An online pre-decision method for emergency regulation of frequency and voltage security and stability considering running condition of equipment is proposed. Considering the influence of system protection, unit primary frequency regulation, automatic generation control and automatic voltage control on node injection after failure, the quasi-steady state mode after failure is automatically identified, and the frequency and voltage pre-decision-making model with the goal of minimizing comprehensive control cost is constructed. A check plan is formed through the enumeration and combination of measures, and the check plan screening is realized based on the rapid estimation of the measure adjustment amount. The iterative search of the pre-decision strategy taking into account the frequency and voltage safety issues is realized, and the specific equipment and control quantities are given. After the actual fault occurs, emergency control is carried out by matching the fault and the post-fault problem to reduce the risk of grid accidents. The effectiveness of the method is verified by an actual grid calculation example.

**Keywords:** safety and stability of frequency and voltage; system protection; grid failure plans; emergency regulation; online pre-decision

(编辑 方晶)