

风电接入下断面极限传输功率运行规则的场景聚类提取方法

刘若凡¹,刘俊勇¹,刘友波¹,杨嘉澍²,苟竞¹,许立雄¹,蒋长江¹,陈晨¹,BAZARGAN Masoud³

(1. 四川大学 电气信息学院,四川 成都 610065;2. 国网四川省电力公司,四川 成都 610061;

3. 阿尔斯通电网研究与技术中心,英国 斯塔福德 ST17 4LX)

摘要: 在传统运行规则制定方法的基础上,提出风电接入下断面极限传输功率(TTC)运行规则的场景聚类提取方法。以风电场出力-负荷水平为标准对网络状态进行场景聚类,在某场景下计算TTC风险值作为调度参考依据。规则的形成使用数据挖掘技术,分为样本生成、特征选择、规则提取3个步骤。综合所有场景调度信息,生成包含风电信息的TTC规则库。用IEEE 39节点系统进行考虑暂态安全的算例仿真,结果表明了所提方法提取的TTC调度信息能较好地体现电网运行状态与TTC间的关系。

关键词: 风电; 极限传输功率; 场景聚类; 运行规则; 数据挖掘; 风险

中图分类号: TM 61; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.011

0 引言

随着电网规模的增大,互联系统输电通道可用传输容量ATC(Available Transfer Capability)的计算和评估已成为电力系统分析中的一个重要任务。极限传输功率TTC(Total Transfer Capability)作为ATC计算的基础^[1],常成为调度人员进行调度决策的重要依据。由于大量清洁能源的接入和电网运行方式的日益复杂,使用某固定值作为断面TTC的传统方法越来越难以提供有价值的信息,主要体现在:新能源接入带来不确定性对TTC有较大影响;传统TTC不包含任何调度辅助决策信息,无法为调度员调度行为提供定量支持。

目前,国内外都在向智能调度方向发展,以期解决电网规模和复杂性增加后电网调度的安全和经济运行问题^[2]。考虑风电接入、利用PMU在线实测数据对TTC进行评估并给出调度决策信息符合该发展方向。文献[3]使用蒙特卡洛M-C(Monte-Carlo)法对TTC进行评估,但只将故障集加入仿真,未考虑发电和负荷不确定性对TTC的影响。文献[4]经过时域仿真定性地验证了风机参数、风速分布对TTC分布的影响,但未将这些因素放置于系统层面进行分析,以致结果具有局限性。文献[5]分别采用常规M-C法和经聚类处理的改进M-C法对含风电网络的TTC进行评估,不足是未将评估深化至应用层面。文献[6-7]提出了电力系统精细规则的概念,综合运用电力系统分析技术与数据挖掘技术建立传统TTC指标与可观测电气量的数学关系,为调度行为

提供一定的决策信息;不足是未全面地考量网络运行状态对规则的影响,表现在样本集内容比较单一。

综上问题与研究,本文综合考虑风电接入对TTC数值分布和调度规则的影响。离线状态下通过聚类风电出力和全系统负荷大小刻画系统场景,并对各场景分别进行故障态和安全态的潮流计算仿真,生成潮流样本集;故障态仿真数据用于计算该场景下TTC风险阈值;安全态仿真数据用于形成不同场景下样本集合,经数学处理后形成TTC调度规则库,供调度员经过简单的在线匹配后进行辅助决策。IEEE 39节点系统的算例仿真验证了结论的正确性和合理性。

1 基于自组织映射聚类的风电-负荷场景生成

TTC的计算结果广泛受到系统基础状态的影响。系统基础状态包括输电网络物理结构、发电机组出力分配情况、系统负荷大小和系统受扰动情况等。文献[5]证明,风电出力和系统负荷大小是随时间而变化的连续变量,多数系统状态的变化受到其较大影响。使用某时刻风电出力-系统总负荷的二维数组对该时刻系统状态进行表征,并对一个时期内所有二维数组进行聚类处理得出运行状态场景,能极大减少由分析系统状态而产生的巨大计算负担。考虑到场景的思想在含风电的电力系统分析和调度研究中得到的广泛应用^[8-9],以场景聚类中心运行状态为基准所提取的TTC规则可在一定程度上代表该场景所包含的所有运行状态对应的TTC规则,称之为该场景的主规则。同时,为了应对部分重要机组功率变化对TTC调度规则的影响,在某聚类场景大背景下,通过改变机组或区域出力分配模式以生成相应子场景,以子场景为二级单位提取调度规则。

自组织映射SOM(Self-Organizing Map)是一种无需监督的自动神经网络聚类工具^[10]。SOM网络由

收稿日期:2013-10-28;修回日期:2014-09-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51261130472,512070-98);国网总部科技项目(5442YD120008)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51261130472,51207098) and Science and Technology Project of State Grid(5442YD120008)

输入层和输出层组成,计算过程基于竞争式神经网络。基于本文研究要点,首先定义网络风电最大出力 P_{\max} 、最大负荷 $P_{L\max}$ 作为基准值,式(1)和式(2)分别描述了输入层和输出层。

$$\begin{bmatrix} P_1 & P_2 & \cdots & P_n \\ P_{L1} & P_{L2} & \cdots & P_{Ln} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} P_{s1} & P_{s2} & \cdots & P_{sm} \\ P_{Ls1} & P_{Ls2} & \cdots & P_{Lsm} \\ p_{s1} & p_{s2} & \cdots & p_{sm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, P_j 和 P_{Lj} ($j=1, 2, \dots, n$) 分别为 t_j 时刻风电出力和总负荷; n 为采样个数; P_{si} 和 P_{Lsi} ($i=1, 2, \dots, m$) 分别为场景 i 下的风电出力和系统总负荷的聚类中心值; p_{si} ($i=1, 2, \dots, m$) 为场景 i 出现的概率; m 为聚类场景个数。

图 1 为基于 SOM 的风电-负荷 5 场景聚类情况示意图。图中每一点代表一个时刻下的系统状态。

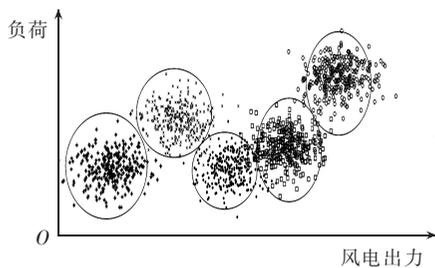


图 1 风电-负荷 5 场景聚类结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of five wind power-load scenario clusters

研究中一般认为风电场有功出力等于该风电场内所有风机出力之和。式(3)描述了在已知风机参量和风速情况下,计算单一风机出力 P_{WT} 的方法:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & v < v_{cin} \\ P_N(A + Bv + Cv^2) & v_{cin} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v \leq v_{co} \\ 0 & v > v_{co} \end{cases} \quad (3)$$

其中, P_N 为风机额定有功出力; v 为当前风速; v_{cin} 、 v_N 和 v_{co} 分别为风机切入风速、额定风速和切出风速; A 、 B 、 C 均为常数,由风机物理特性决定。风机无功出力采取恒功率因数控制,即:

$$Q_{WT} = P_{WT} \tan \varphi \quad (4)$$

其中, φ 为功率因数角。

2 TTC 运行规则提取和应用

2.1 TTC 算法说明

TTC 计算为本文计算核心。考虑数学模型, TTC 算法有基于连续潮流 CPF (Continuous Power Flow) 方法^[11]、基于最优潮流的方法^[12]; 考虑约束条件, 主要有暂态约束算法^[13]和电压约束算法^[14]。为了更接近实际, 本文使用了计及暂态稳定的 CPF 算法。计算中, 负荷首次增长步长的总量设置为基态负荷总量

的一半, 各负荷有功增长方向由初始大小按比例确定; 发电机有功出力增长方向由该机出力裕度大小按比例确定; 发电机采用恒功率因数控制, 从而控制无功出力增长方向。计及暂态稳定的 TTC 计算中, 故障设置为断面潮流最重线路在供电区端发生三相短路接地, 切除时间为 0.1 s。

2.2 调度规则提取步骤

现有调度方式将断面实际传输功率小于某固定的预置功率作为输电断面安全标准, 制定思路较保守, 以致输电通道电能传输能力难以充分利用。由于电力系统是一个复杂的高维非线性系统, 本文采用数据挖掘技术对输电断面运行规则进行提取, 主要分为以下步骤: 大数据样本形成; 特征属性选择, 提出一种基于线性回归精度的前后交替特征属性选择方法; 规则提取和表示。

2.3 大数据样本空间形成

基于全状态的传统 M-C 仿真的 TTC 评估可提供 TTC 均值、方差等基本信息, 但是对于系统状态和 TTC 的关系并不能良好地表征, 难以应用至实际。基于以上问题, 以场景为单位进行安全态大样本仿真, 提取场景 TTC 信息, 得出规则制定所需样本空间。安全态下不考虑故障, 仅考虑风电出力和负荷总量的场景内波动, 即将风电出力和负荷水平约束在保守的范围内。样本空间形成流程如下。

a. 获取基态潮流。选择某一场景聚类中心为仿真基准值, 根据 2.1 节方法进行 TTC 计算。其中, 若对发电机组初始功率分布进行调整, 则生成该场景下子场景基态潮流。

b. 获取新潮流。保留基态拓扑结构, 重新设置负荷量、风电出力和其他发电机出力。①计算该聚类中心与其余聚类中心欧氏距离, 取负荷距离最小值的一半作为负荷总量波动范围上下限额, 负荷总量在限额内随机波动, 变化量记为 ΔP_L ; ②取风电出力最小距离的一半作为风电出力总量波动范围上下限额, 在此限额内随机波动; ③普通发电机平均分配剩余负荷量; ④发电机节点电压在的额定电压的 $-5\% \sim 5\%$ 范围内随机波动; ⑤计算潮流并用 2.1 节方法计算 TTC, 得到新潮流数据。

c. 采集系统变量数据。记录新潮流和基态潮流间总发电量、总负荷量、各母线电压、各区域总发电量、各区域总负荷量、各负荷量、各发电机出力的差值和 TTC 的差值 ΔTTC , 综合形成一个样本。

d. 形成样本空间。重复上述步骤, 直到样本数量满足要求。

2.4 特征属性选择

特征选择的目的是从一个大的候选属性集合中选择一个较好的、有代表性的属性子集^[15]。在实际应

用中,过多的属性会严重影响归纳学习的质量,加大训练数据量,影响学习速度,降低所生成规则的精度。

电力系统是典型高维非线性系统。处理实际问题前,对系统进行线性化处理和数据降维能大量减轻计算负担并提供给调度人员更直观的辅助调度策略。本文提出一种基于线性回归精度分析的特征属性选择方法。该方法不需要对数据进行预处理,直接利用统计学中回归精度表征待选属性与目标属性之间相关程度,自行剔除冗余。对任意场景 i ,用复相关系数^[16]与场景聚类中心风电出力的比值作为相关度测试标准 T_R ,定义如式(5)所示。

$$T_R = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \bar{y})^2}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2} / P_{S_i} \quad (5)$$

其中, y_j 为第 j 个样本目标属性,即 ΔTTC_i ; \hat{y}_j 为相应线性回归预测值; \bar{y} 为全部样本的均值; P_{S_i} 为场景 i 聚类中心风电出力。

兼顾计算速度、选择精度和实际需求,本文提出先用双向搜索法选择初始特征属性集合,再根据需要设置精度阈值进行二次筛选的特征提取方法。双向搜索法使用序列前向选择与序列后向选择分别从两端开始搜索,两者搜索到共同的最优子集 Y 时停止搜索。该方法在保留序列前向选择法运算速度快的优势的同时,用考虑属性间相互关系较完善的序列后向选择进行协同运作,使特征选择结果更加精确。选择过程如下。

a. 初始化前向选择。令初始属性集合为 M_1 ,包含全属性; S_1 为特征属性集合,初始化为空集; T 为目标属性。

b. 初始化后向选择。令初始属性集合为 M_2 ,设置为空集; S_2 为特征属性集合,包含全属性; T 为目标属性。

c. 进行前向选择。每次选择一个 $m_i \in M_1$ 加入特征属性集合 S_1 ,使 $T_R(T; S_1 \cup m_i)$ 最小并将其从 M_1 中删除。 $T_R(T; S_1 \cup m_i)$ 为以 $(S_1 \cup m_i)$ 中属性为自变量、目标属性为因变量进行线性回归后的 T_R 。

d. 进行后向选择。每次选择一个 $s_i \in S_2$ 剔除特征属性集合 S_2 ,使 $T_R(T; S_2 \cup m_i)$ 最大。

e. 依次重复进行步骤 **c** 和 **d**。步骤 **c** 中加入的属性不能在步骤 **d** 中删除,步骤 **d** 中删除的属性不能在步骤 **c** 中加入。 $S_1 = S_2$ 时,选择结束。

f. 二次筛选,分为机器筛选和人工筛选。重复步骤 **a** 对初次筛选的特征属性进行再初始化,根据需要设置精度阈值(一般为规定特征值个数)使用顺序浮动前进(SFFS)算法^[17]进行特征选择,SFFS 算法每次选择一个较好的特征子集后,都动态地剔除一些较差的特征,有效避免了陷入局部最优。当特征属性

满足数量要求时,机器筛选结束,获得特征属性集合 S' 。最后通过人工选择便于调控且符合经济性的属性,形成最终的特征属性集合 S 。

2.5 规则生成

分别对各场景下目标属性 TTC_{S_i} 和特征属性集合 S_i 进行线性回归,最终表达形式为一簇一次多元多项式:

$$\Delta TTC_{S_i} = b_{S_{i1}} x_{S_{i1}} + b_{S_{i2}} x_{S_{i2}} + \dots + b_{S_{in}} x_{S_{in}} \quad (6)$$

其中, ΔTTC_{S_i} 为场景 i 下实际 TTC 相对于基态 TTC 的预测偏差量; $x_{S_{i1}}, x_{S_{i2}}, \dots, x_{S_{in}}$ 为特征属性; $b_{S_{i1}}, b_{S_{i2}}, \dots, b_{S_{in}}$ 为线性回归系数。

2.6 TTC 风险阈值计算

设置各场景下 TTC 风险阈值,通过对比断面实际传输功率与其所属场景的风险值,辅助调度员对断面当前运行状态进行快速评估。风险阈值应满足:若断面实际传输功率小于该值,发生严重故障时能保证电网安全稳定运行,计及最严重故障暂态安全的 TTC 计算结果满足要求;然而,为了更好地突出提示风险这一功能,本文以 $N-1$ 故障切除后的状态为潮流基准进行计及最严重故障暂态安全性的 TTC 计算,并求其权值作为风险阈值。某场景下 TTC 风险阈值计算流程如下。

a. 获取基态潮流。选择场景 i 聚类中心负荷水平及风电出力数据计算基准 TTC 。

b. 初始化故障集合。设置 $j=1$ (j 为故障编号)。

c. 含故障的 TTC 计算。调用第 j 个故障并切除,然后计算计及暂态安全的 TTC 。

d. 故障集合计算未结束,则 $j=j+1$,返回步骤 **c**。

e. 故障集合计算结束,使用式(7)、(8)计算该场景下 TTC 风险阈值。

计算流程如图 2 所示。

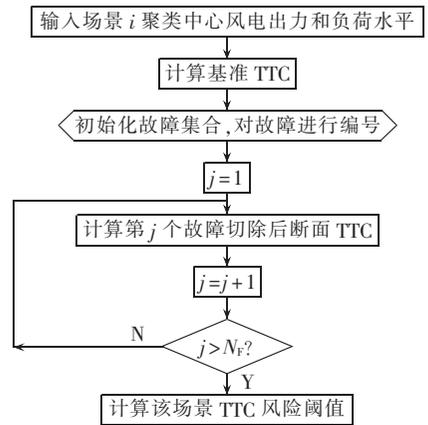


图 2 单一场景 TTC 风险阈值计算流程图

Fig.2 Flowchart of TTC risk threshold calculation for single scenario

$$\overline{TTC}_i = \sum_{j=1}^{N_f} (TTC_{F_j} P_{F_j}) + TTC_{B_i} P_{N_i} \quad (7)$$

$$P_{N_i} = 1 - \sum_{j=1}^{N_f} P_{F_j} \quad (8)$$

其中, \overline{TTC}_i 为场景 i 的 TTC 风险阈值; TTC_{Bi} 为场景 i 的基准 TTC; p_{F_j} 为故障 j 发生的概率; TTC_{F_j} 为切除故障 j 后 TTC 值; p_{N_i} 为场景 i 正常运行的概率; N_F 为故障序列中故障总数。

3 算例分析

3.1 基础数据和场景聚类结果

用 IEEE 39 节点系统进行算例仿真验证方法的有效性。如图 3 所示母线 17 接入风电场, 包含 200 台机组, 每台机组额定容量 2 MW, 总装机容量 400 MW, 风机参数如下: $v_{\text{cut}}=4 \text{ m/s}$, $v_N=10 \text{ m/s}$, $v_{\text{co}}=22 \text{ m/s}$, $P_N=2 \text{ MW}$, 功率因数为 0.95。

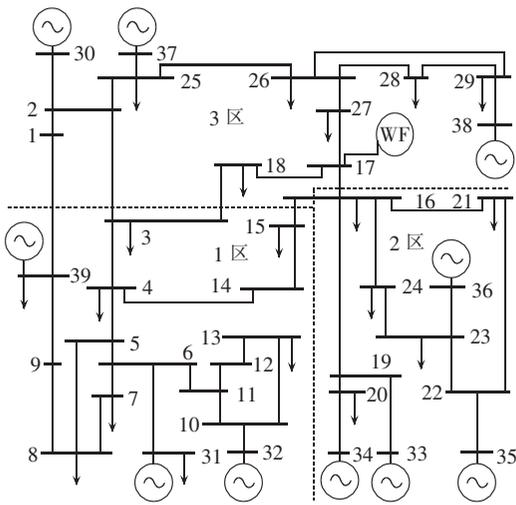


图 3 含风电场的 IEEE 39 节点系统
Fig.3 IEEE 39-bus system with wind farm

分区方法取自文献 [18], 本文研究 3 区与 2 区的联合区域 (以下称为 4 区) 到 1 区的断面 TTC 规则。先指定一个测试场景进行主规则提取、子规则提取和风险阈值计算; 然后对全部场景进行主规则提取, 形成规则库。计算结果均折算为标幺值, 基准值 100 MW。TTC 计算中故障设置为母线 2 与母线 3 之间线路三相短路接地, 切除时间为 0.1 s。

以小时为单位提取风电出力和负荷水平的组合 (时间跨度为 1 a), 用于场景聚类基础数据, 以小时为单位的年度风速曲线如图 4 所示。

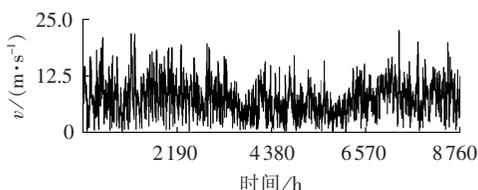


图 4 以小时为单位的年度风速曲线
Fig.4 Hourly wind speed curve for a year

输入量 (风电场出力和系统负荷) 被分为 5 个场景, 如表 1 所示。选择场景 1 为测试场景。

表 1 聚类结果

场景聚类编号	聚类中心	出现概率
1	[180, 5850]	0.20
2	[257, 4637]	0.31
3	[142, 5145]	0.18
4	[350, 5505]	0.21
5	[27, 4987]	0.10

3.2 测试场景 TTC 调度规则提取及风险阈值计算

3.2.1 测试场景 TTC 主调度规则提取及其风险阈值计算

测试场景聚类中心状态下断面实际传输功率为 828.15 MW; TTC 为 1346.98 MW; TTC 风险阈值为 1198.68 MW。计算结果显示, 测试场景下, 所得 TTC 风险阈值大于断面实际传输功率, 略小于计及最严重故障安全性的 TTC 值。说明使用该值作为风险阈值既保证了电网安全, 也给调度员留下了充足的调度空间。当断面实际传输功率大于风险阈值时, 调度员即可参考调度规则, 适当提高 TTC 水平。

用 2.3 节方法生成样本空间, 获得训练样本 2000 个, 每个样本包含 160 个备选属性和 1 个目标属性 ΔTTC 。

用本文方法进行特征选择结果见表 2。可以发现: ①特征属性对应的母线、发电机、负荷与断面电气距离较近, 一定程度上说明了电气距离的大小对电网属性间相关度具有影响; ②电力系统相关研究认为, 线路/断面发电端母线电压与其传输容量有强相关关系, 该理论一定程度上解释了特征属性中包含较多电压类属性这一现象出现的原因。

表 2 特征选择结果

特征属性	含义解释
$\Delta P_{4\text{Tload}}$	4 区 (供区) 负荷变量
ΔU_{B1}	母线 1 (供区) 电压变量
ΔU_{B2}	母线 2 (供区) 电压变量
ΔU_{B3}	母线 3 (受区) 电压变量
ΔU_{B18}	母线 18 (供区) 电压变量
ΔP_{125}	母线 25 (供区) 负荷变量
ΔP_{139}	母线 39 (受区) 负荷变量
ΔP_{G17}	风电场 (供区) 出力变量
ΔP_{G33}	33 号机 (供区) 出力变量
ΔP_{cross}	断面实际传输有功变量

式 (9) 为测试场景 TTC 主调度规则:

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_1 = & -0.087 \Delta P_{4\text{Tload}} + 11.987 \Delta U_{B1} + 24.188 \Delta U_{B2} - \\ & 1.514 \Delta U_{B3} + 4.782 \Delta U_{B18} - 0.231 \Delta P_{125} + \\ & 0.444 \Delta P_{139} - 0.108 \Delta P_{G17} - 0.196 \Delta P_{G33} + \\ & 0.557 \Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (9)$$

分析式 (9) 可知: 供电区负荷以及供电区发电机出力越大则断面 TTC 越小; 适当抬高断面供电区侧

母线电压或降低受电区侧母线电压,可以提高 TTC 水平;断面初始功率越大,TTC 越大。

3.2.2 测试子场景 TTC 子调度规则提取及其风险阈值计算

保持总负荷量与风电场出力仍未测试场景聚类中心数据不变,仅调整发电机出力分布与负荷分布以形成子场景运行中心状态;2 区负荷 40% 转移至 3 区,3 区各负荷按初始负荷比例确定增量;同样方法改变 2 区与 3 区各发电机出力,形成子场景 1-1。

以子场景运行中心潮流数据新的基态潮流,其断面实际传输功率为 790.21 MW;TTC 为 1295.12 MW;TTC 风险阈值为 1079.80 MW。子场景 1-1 的 TTC 调度规则为:

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_{1-1} = & -0.099\Delta P_{4\text{load}} - 0.132\Delta P_{3\text{load}} + \\ & 9.112\Delta U_{B1} + 21.375\Delta U_{B2} - 1.508\Delta U_{B3} + \\ & 4.558\Delta U_{B18} - 0.411\Delta P_{125} + 0.577\Delta P_{139} - \\ & 0.106\Delta P_{G17} + 0.287\Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\Delta P_{3\text{load}}$ 为 3 区总负荷。

对比式(9)、(10)可知:同一聚类场景下,由于负荷和发电机出力分配情况的不同,断面 TTC、TTC 风险阈值以及调度规则均发生了变化。2 区负荷水平和发电机出力弱化导致特征属性 ΔP_{G33} 被剔除,而 3 区总负荷 $\Delta P_{3\text{load}}$ 被加入;但是相同特征属性对 TTC 的定性影响是不变的,比如在任何场景下提高供电侧断面母线电压,均能提高 TTC 水平。因此,以聚类场景中心为基准生成的主调度规则可以满足该场景下大部分电网运行状态的需要;对于同场景下较为特殊的运行状态,依然可以用本文方法生成子场景规则,满足特殊需要。

3.3 测试场景 TTC 调度规则精度测试

3.3.1 主规则精度测试

选择测试运行状态 [155, 5742], 即风电场出力 155 MW, 系统总负荷 5742 MW, 将其归为场景 1。用 2.3 节方法以 [155, 5742] 为中心生成 200 个总负荷量与风电总发电量偏差为 -5%~5% 的测试样本。

利用场景 1 主调度规则式(9)对生成的 100 个测试样本进行了验证,结果表明,用主调度规则得到的 TTC 预测值和实际计算结果间最大绝对误差为 0.51 p.u., 平均相对误差为 2.98%。图5 给出了测试结果与实际结果的对比曲线,图中 TTC 为标幺值。由图可见,用本文方法提取的调度规则所估计的 TTC 与实际 TTC 保持了较高的一致性,比较准确地体现了 TTC 的特性。

3.3.2 子场景规则精度测试

测试运行状态总负荷量及风电场出力不变,用 3.2 节方法修正 2 区与 3 区负荷及发电分布生成新运行状态,将其归于子场景 1-1。用上文方法进行精度测试,结果表明用子场景 1-1 的调度规则得到的

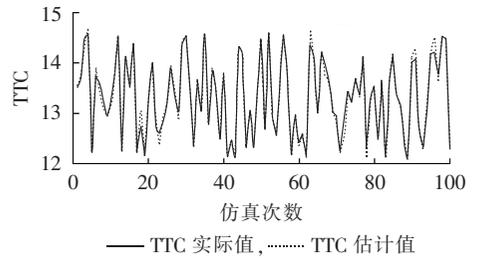


图 5 调度规则精度测试结果

Fig.5 Results of dispatch rule precision test

TTC 预测值和实际计算结果之间的最大绝对误差为 0.57 p.u., 平均相对误差为 3.16%。可以看出,子场景调度规则的精度虽然略低于主规则,但也能与实际 TTC 保持较好的一致性。

3.4 TTC 主调度规则库

式(11)~(14)分别对应场景 2~5 的主规则。其中未在表 2 中体现的变量 ΔP_{126} 为母线 26 负荷变量; $\Delta P_{2\text{load}}$ 为 2 区总负荷。

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_2 = & -0.022\Delta P_{4\text{load}} + 15.004\Delta U_{B1} + \\ & 19.531\Delta U_{B2} + 1.118\Delta U_{B18} - \\ & 1.202\Delta P_{125} + 0.411\Delta P_{139} - \\ & 0.242\Delta P_{G17} + 0.973\Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_3 = & -0.092\Delta P_{2\text{load}} - 0.188\Delta P_{3\text{load}} + \\ & 17.001\Delta U_{B1} + 28.972\Delta U_{B2} + \\ & 1.318\Delta U_{B16} - 0.925\Delta P_{125} - \\ & 2.557\Delta P_{126} + 1.120\Delta P_{139} - \\ & 0.157\Delta P_{G17} + 0.512\Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_4 = & -0.125\Delta P_{4\text{load}} - 0.082\Delta P_{3\text{load}} + \\ & 11.075\Delta U_{B1} + 15.122\Delta U_{B2} + \\ & 4.128\Delta U_{B16} - 0.915\Delta P_{125} + \\ & 0.588\Delta P_{139} - 0.877\Delta P_{G17} + \\ & 0.307\Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{TTC}_5 = & -0.274\Delta P_{4\text{load}} + 15.133\Delta U_{B1} + \\ & 15.256\Delta U_{B2} + 4.212\Delta U_{B16} - \\ & 1.112\Delta P_{125} - 3.101\Delta P_{126} + \\ & 0.299\Delta P_{139} - 0.177\Delta P_{G17} + \\ & 0.508\Delta P_{\text{cross}} \end{aligned} \quad (14)$$

对比式(9)、(11)~(14)可知:各场景下规则内容的不同点主要体现在特征属性不同以及相同特征属性前系数的不同,说明随着风电场出力和系统总负荷的变化,电网潮流分布、电压水平、静态和暂态安全裕度均产生变化,电力系统的强烈非线性导致了 TTC 的变化规律也随之改变;各规则所包含的特征属性不存在重大差异,且各属性对 TTC 的定性影响基本保持一致,说明电力系统部分属性间具有内在联系。

4 结论

本文在分析传统 TTC 调度规则及其提取方法的

基础上引入了风电的相关研究内容,使用场景聚类法初步解决了风电和负荷的不确定性对 TTC 规则的影响,给出了调度依据来丰富 TTC 调度规则的内容。算例分析得出以下结论。

a. 场景聚类法能将复杂的系统状态使用多个聚类中心来代表,一定程度上减轻了不确定性分析负担,更好地体现了断面 TTC 与系统状态间关系;子场景的概念以及子规则的提取也一定程度上解决了同一大场景下部分特殊运行状态脱离于聚类中心范畴从而导致 TTC 调度规则变化的问题。

b. TTC 调度规则能给调度员直观的辅助调度决策信息,在一定程度上指导调度员进行定量的调度行为。

c. TTC 风险阈值的设定较好地体现了风险的潜在性,给调度员提供了适当的缓冲区域进行调度行为。

d. 主规则和子规则的精确性均得到了验证,证明了规则的可靠性。

本文下一步研究方向有:大规模风电外送通道 TTC 与风电场属性、风机模型、风速特性间关系的研究;多通道间 TTC 相互关系的研究;综合规则与经济性的相关控制策略;研究更精确的方法对 TTC 进行计算,如发电机出力和负荷增长方式的修正。

参考文献:

- [1] 郭琦,赵晋泉,张伯明,等. 一种线路极限传输容量的在线计算方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(5):1-5.
GUO Qi,ZHAO Jinqun,ZHANG Boming,et al. A method for on-line computation of total transfer capability[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(5):1-5.
- [2] 刘俊勇,沈晓东,田立峰,等. 智能电网下可视化技术的展望[J]. 电力自动化设备,2010,30(1):7-13.
LIU Junyong,SHEN Xiaodong,TIAN Lifeng,et al. Prospects of visualization under smart grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(1):7-13.
- [3] BERIZZI A,BOVO C,DELFIANTI M,et al. A Monte Carlo approach for TTC evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(2):735-743.
- [4] FALAGHI H,RAMEZANI M,SINGH C,et al. Probabilistic assessment of TTC in power systems including wind power generation[J]. IEEE Systems Journal,2012,6(1):181-190.
- [5] RAMEZANI M, SINGH C,HAGHIFAM M R. Role of clustering in the probabilistic evaluation of TTC in power systems including wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(2):849-858.
- [6] 蒋维勇,孙宏斌,张伯明,等. 电力系统精细规则的研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):1-7.
JIANG Weiyong,SUN Hongbin,ZHANG Boming,et al. Fine operational rule of power system[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):1-7.
- [7] 王康,孙宏斌,蒋维勇,等. 智能控制中心二级精细化规则生成方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(7):45-49.
WANG Kang,SUN Hongbin,JIANG Weiyong,et al. A two-level refinement method for operational rules in smart control centers[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(7):45-49.
- [8] 谢毓广,江晓东. 储能系统对含风电的机组组合问题影响分析[J].

电力系统自动化,2011,35(5):19-24.

- XIE Yuguang,JIANG Xiaodong. Impact of energy storage system on the unit commitment problem with volatile wind power[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):19-24.
- [9] 刘新东,方科,陈焕远,等. 利用合理弃风提高大规模风电消纳能力的理论研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(6):35-39.
LIU Xindong,FANG Ke,CHEN Huanyuan,et al. Research on rational wind power casting theory for large-scale wind power integration improvement[J]. Power System Protection and Control,2012,40(6):35-39.
 - [10] KOHONEN T. The self-organizing maps[J]. Proceedings of the IEEE,1990,78(9):1464-1480.
 - [11] 刘焕志,李扬,陈霄. 基于连续潮流的输电网可用输电能力计算[J]. 电力自动化设备,2003,23(12):5-9.
LIU Zhihuan,LI Yang,CHEN Xiao. Available transfer capability calculation based on continual power flow for transmission network[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(12):5-9.
 - [12] 汪峰,白晓民. 基于最优潮流方法的传输容量计算研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):35-40.
WANG Feng,BAI Xiaomin. OPF based transfer capability calculation[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(11):35-40.
 - [13] 莫海勇,李林川,刘杨. 考虑暂态稳定约束的联络线最大传输功率计算[J]. 高电压技术,2007,33(9):120-124.
MO Haiyong,LI Linchuan,LIU Yang. Calculation on the maximum transfer capability considering transient stability constraints of tie-lines[J]. High Voltage Engineering,2007,33(9):120-124.
 - [14] 王成山,李慧聪,魏炜,等. 考虑电压稳定性约束的输电能力综合计算[J]. 电力自动化设备,2004,24(1):9-13.
WANG Chengshan,LI Huicong,WEI Wei,et al. Integrative computation of transfer capability with voltage stability constrain[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(1):9-13.
 - [15] 刘明吉,王秀峰,饶一梅. 一个混合特征属性选择算法[J]. 计算机科学,2000,27(11):75-78.
LIU Mingji,WANG Xiufeng,RAO Yimei. A mixing algorithm for feature attribute selection[J]. Computer Science,2000,27(11):75-78.
 - [16] 李同强,周天戈,吴斌. 基于改进遗传算法的加权模糊 C 均值聚类算法[J]. 计算机应用,2009,29(B12):260-262.
LI Tongqiang,ZHOU Tianye,WU Bin. Weighted fuzzy C-mean clustering algorithm based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Computer Applications,2009,29(B12):260-262.
 - [17] 叶吉祥,龚希龄. 一种快速的 Wrapper 式特征子集选择新方法[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版,2010,7(4):69-73.
YE Jixiang,GONG Xiling. A novel fast Wrapper for feature subset selection[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology:Natural Science,2010,7(4):69-73.
 - [18] BABULAL C K,KANNAN P S. A novel approach for ATC computation in deregulated environment[J]. Journal of Electrical System,2006,2(3):146-161.

作者简介:



刘若凡

刘若凡(1990—),男,四川成都人,硕士研究生,研究方向为电力系统新能源(E-mail: butterruofan@gmail.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定与控制、电力系统脆弱性分析、电力市场、电力系统可视化系统等。

(下转第 80 页 continued on page 80)

- 负荷预测模型[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 13-17.
- LIU Baoying, YANG Rengang. Short-term load forecasting model based on LS-SVM with PCA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 13-17.
- [13] HE Dong, LIU Ruiye. Ultra-short-term wind power prediction using ANN ensemble based on PCA[C]//2012 7th International Power Electronics Motion Control Conference. Haerbin, China: IEEE, 2012: 2108-2112.
- [14] SEEGER M. Gaussian processes for machine learning[J]. International Journal of Neural System, 2004, 14(2): 69-106.
- [15] KERSTING K, PLAGEMANN C, PFAFF P, et al. Most likely heteroscedastic gaussian process regression[C]//Proceedings of the 24th Annual International Conference on Machine Learning. Corvallis, USA: IEEE, 2007: 393-400.
- [16] KRASKOV A, STOGBAUER H, GRASSBERGER P. Estimating mutual information[J]. Physical Review E, 2004, 69(6): 066138.
- [17] FATEMEH A, MOHAMMADMAHDI R Y, CARO L, et al. Mutual information-based feature selection for intrusion detection systems[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2011, 34(4): 1184-1199.
- [18] 任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 41-43, 66.
- REN Ziwu, SAN Ye. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 41-43, 66.

作者简介:



史宇伟

史宇伟(1988—),男,江苏苏州人,硕士,研究方向为风电场短期风速预测(E-mail: shiyuwei007@hotmail.com);

潘学萍(1972—),女,安徽天长人,教授,博士,研究方向为电力系统分析与控制(E-mail: xueping_pan@163.com)。

Short-term wind speed forecasting considering historical meteorological data

SHI Yuwei, PAN Xueping

(School of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A method of short-term wind speed forecasting considering the historical meteorological data is proposed. With the historical wind speed data and historical meteorological data as its original inputs, the HFS(Hybrid Feature Selection) method is applied to select the variables strongly relevant to the wind speed and to generate the input characteristic set of the forecast model. The HGP(Heteroscedastic Gaussian Process) model is then applied to build the forecast model for expressing the randomness of wind speed. A one-hour wind speed forecasting is carried out based on practical wind speed data and results show that the proposed method improves the accuracy of wind speed forecasting.

Key words: wind power; wind speed; forecasting; meteorological data; hybrid feature selection; heteroscedastic Gaussian process; models

(上接第 74 页 continued from page 74)

Scenario clustering method for extracting TTC operating rules of transmission corridor with wind power

LIU Ruofan¹, LIU Junyong¹, LIU Youbo¹, YANG Jiashi², GOU Jing¹, XU Lixiong¹,
JIANG Changjiang¹, CHEN Chen¹, BAZARGAN Masoud³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610061, China;

3. ALSTOM Grid Research & Technology Centre, Stafford ST17 4LX, UK)

Abstract: A scenario clustering method for extracting TTC(Total Transfer Capability) operating rules of transmission corridor integrated with wind power is proposed based on the formulation of conventional operating rules. The scenario clustering is carried out according to the output power of wind farm and the load level and the TTC risk calculated for a certain scenario is taken as the reference of dispatch. The data mining technique is applied in the formation of rules, including sample generation, feature selection and rule extraction. The TTC rule base containing the wind power information is generated by integrating the dispatch information of all scenarios. Case simulation considering transient security is carried out for IEEE 39-bus system and results show that, the TTC dispatch information extracted by the proposed method reflects properly the relationship between power grid operation state and TTC.

Key words: wind power; TTC; scenario clustering; operating rule; data mining; risks