

基于电热协调理论提升电网消纳间歇式能源发电能力的分析

王孟夏¹, 韩学山², 孙宏斌¹

(1. 清华大学 电机系, 北京 100084; 2. 山东大学 电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 提出基于电热协调理论的电网消纳间歇式能源发电方法。建立电热协调的电网消纳模型, 该模型结合间歇式能源发电功率及负荷预测技术, 在超前调度中考虑输电元件电热耦合规律, 以最大允许温度为输电元件载荷能力热限制, 并协调伴随间歇式能源发电波动过程的输电元件载流与温度耦合的动态过程, 使调度能够超前利用载流与温度变化的不同步性, 缓解输电元件载荷能力依据电流判别的紧张局面, 从而提升电网消纳间歇式能源发电的能力。算例分析结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 电力系统; 电热协调; 输电能力; 间歇式能源发电; 输电元件; 模型

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.09.002

0 引言

我国风电已连续 5 年实现了装机容量翻倍^[1], 且根据“十二五”规划, 预计到 2015 年我国风电装机容量将比 2010 年再增长 3 倍以上, 达 90~100 GW, 光伏发电达 10 GW。相比间歇式能源的开发利用, 电网的规划、建设周期相对较长, 发展滞后, 难以满足快速增长的间歇式能源发电并网需求, 已成为制约消纳间歇式能源的主要因素之一^[2-4]。对此, 加速电网建设固然是有效的解决途径, 但存在占用土地资源、投资大的问题, 且间歇式能源利用率较低(如风电等效满发年利用小时数通常在 2 000 h 左右), 使配套的电网建设经济效益问题更为突出^[5]。因此, 从电网运行的经济性、节能减排等方面考虑, 充分挖掘现有电网输电潜力, 提高电网使用效率无疑是缓解输电能力制约、增强消纳间歇式能源发电能力的良好对策。

间歇式能源发电并网运行后, 从电网消纳的角度应尽量避免由于网络制约导致间歇式能源发电的不完全消纳。对此, 国外已将动态热定值(DTR)技术引入风电接入地区对关键输电线路实施动态增容, 根据实测输电线路运行状态及气象条件实时计算输电线路热电流定值, 应用结果表明其对电网消纳风电能力的提升效果显著^[6-8]。但输电元件热限制的本

质是温度, 热电流定值在温度的动态过程中无法体现输电元件真实的载荷能力, 热电流定值与温度体现输电元件载荷能力的不一致必然导致输电元件载荷能力无法被充分利用。在间歇式能源并网运行条件下, 受气象条件影响, 间歇式能源发电功率具有较强的间歇性和波动性, 能够在十几分钟内由零功率输出达到满发, 其并网运行必然加剧输电元件载流波动, 使载流与温度表征输电元件载荷能力的不一致问题更为凸显, 制约电网消纳间歇式能源发电。

电热协调(ETC)理论的提出^[9-10], 使输电元件温度变化特性直接纳入电网运行分析、调度及控制决策之中成为可行^[11-13]。在此基础上, 本文将 ETC 理论用于增强电网消纳间歇式能源发电并网运行调度之中, 建立相应数学模型, 分析 ETC 的作用机理及有效性, 为电网消纳间歇式能源发电提供新的思路 and 手段, 对增强电网消纳间歇式能源能力, 实现节能减排具有重要的理论意义和现实价值。

1 问题概述

如前所述, 输电元件过载的本质是温度, 其滞后于载流连续变化(物理上的热惯性性质), 即输电元件温度变化到最大允许温度的时间滞后于其热电流变化到限值的时间。输电元件载流变化越剧烈, 温度的滞后现象越明显, 载流与温度对输电元件过载描述的不同步性越严重。在间歇式能源发电并网运行条件下, 消纳大量间歇式能源发电需通过输电网络, 间歇式能源发电功率波动需在全网中平衡, 这必然加剧电网中的潮流波动, 使调度以热电流为约束的决策保守性更为凸显, 制约电网消纳能力。显然, 若能在调度中考虑输电元件电热耦合规律, 并在约束中以温度作为输电元件过载的度量, 实现对输电元件载流与温度变化不同步性的利用, 必然有利于高

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-07-22

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51025725); 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA05A101); 国家自然科学基金重大项目(51190105); 国家自然科学基金资助项目(50677036); 中国博士后科学基金资助项目(2012M520271)

Project supported by Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of China(51025725), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2011AA05A101), Major Program of National Natural Science Foundation of China(51190105), the National Natural Science Foundation of China(50677036) and China Postdoctoral Science Foundation Funded Project(2012M520271)

效地利用电网,增强电网消纳间歇式能源发电能力。

2 数学模型

考虑到目前风、光伏电站大都具有一定的有功、无功调控能力,且与调度中心互动实现有功、无功的自动控制,并使其具备一定的传统电源特性是必然的发展趋势^[14]。因此,在以下建模过程中,将间歇式电源与常规电源做类似处理,以间歇式电源有功功率预测值作为其有功输出功率上限,并设定间歇式能源发电无功功率范围代表其无功调节能力。

在调度决策中考虑输电元件电热耦合动态过程,其数学模型必然涉及代数、微分方程的联立,本质上属于动态优化调度范畴,可将其代数化(差分步长为 τ)形成动态优化调度模型。

2.1 目标函数

设超前调度前瞻时段的起始时刻为 $t_0, t_f - t_0$ 为前瞻时间窗口。目标函数选为发电成本与弃风、光等间歇式能源的惩罚费用之和最小,目标函数可表示如下:

$$\min J = \sum_{t=t_0}^{t_f} \left\{ \sum_{i \in S_G} [\alpha_i P_{Gi}^2(t) + b_i P_{Gi}(t)] + \sum_{j \in S_W} [\bar{\alpha}_j [\bar{P}_{Gwj}(t) - P_{Gwj}(t)]] \right\} \quad (1)$$

其中, $P_{Gi}(t)$ 为节点 i 发电机组 t 时刻的有功输出; $P_{Gwj}(t)$ 、 $\bar{P}_{Gwj}(t)$ 分别为间歇式能源发电接入节点 j 在 t 时刻输出的有功功率及其预测值; S_G 、 S_W 分别为发电机组及间歇式能源发电接入节点集合; α_i 、 b_i 分别为节点 i 发电机组成本函数的二次和一次常系数; α_j 为间歇式能源发电接入节点 j 的不完全消纳惩罚系数,该系数在循环经济体系下应体现间歇式能源价值^[15],本文中取该系数远大于发电机发电成本系数。式中中等号右边第1项表示调度时段内电网总发电成本(\$);第2项表示调度时段内由于未能完全消纳间歇式能源的惩罚费用(\$)。

2.2 等式约束

在调度过程中,与电网潮流对间歇式能源发电、负荷等电气量变化的响应过程相比,输电元件温度的响应过程几乎是瞬时完成的,两者在快、慢程度上存在显著差异。因此,当考虑输电元件电热耦合关系,同时涉及电网潮流及输电元件温度状态量时,电网潮流可用一组代数方程描述,而输电元件温度的变化过程则用微分方程(热平衡方程)描述,由此构成电热耦合的潮流等式约束如式(2)~(4)所示。

a. 伴随温度变化的潮流约束。

$$P_{Gi}(t) + P_{Gwi}(t) - P_{Di}(t) - U_i(t) \sum_{j \in S_B} \{U_j(t) [G_{ij}(T(t)) \times \cos \delta_{ij}(t) + B_{ij}(T(t)) \sin \delta_{ij}(t)]\} = 0 \quad t \in [t_0, t_f], i \in S_B \quad (2)$$

$$Q_{Gi}(t) + Q_{wi}(t) - Q_{Di}(t) - U_i(t) \sum_{j \in S_B} \{U_j(t) [G_{ij}(T(t)) \times$$

$$\sin \delta_{ij}(t) - B_{ij}(T(t)) \cos \delta_{ij}(t)]\} = 0 \quad t \in [t_0, t_f], i \in S_B \quad (3)$$

其中, $P_{Gi}(t)$ 为节点 i 发电机组 t 时刻的有功输出; S_B 为电网节点集合; $Q_{Gi}(t)$ 为节点 i 机组 t 时刻输出无功功率值; $Q_{wi}(t)$ 为节点 i 间歇式电源 t 时刻输出无功功率值; $P_{Di}(t)$ 和 $Q_{Di}(t)$ 分别为节点 i 负荷 t 时刻有功、无功功率预测值; $G_{ij}(T(t))$ 和 $B_{ij}(T(t))$ 为电网节点导纳阵中对应元素,由于考虑输电元件电热耦合规律,该元素随输电元件温度变化而变化(体现在电阻随温度的变化而变化)^[9], $T(t)$ 为输电元件温度效应的抽象函数表达; $U_i(t)$ 、 $\delta_i(t)$ 分别为节点 i 在 t 时刻的电压幅值和相角,同样间接反映电热耦合引起的变化, $\delta_{ij}(t) = \delta_i(t) - \delta_j(t)$ 。式(2)和式(3)表示伴随输电元件温度变化的有功功率和无功功率的潮流方程。

b. 输电元件载流变化的热平衡微分方程。

$$\frac{dT_l(t)}{dt} = \frac{1}{m_l C_{pl}} [Q_a(I_l(t), T_l(t)) - Q_r(T_l(t))] \quad (4)$$

其中, $l \in S_L$, $t \in [t_0, t_f]$, S_L 为输电元件集合, $T_l(t)$ 为 t 时刻输电元件 l 的温度量, m_l 为对应输电元件 l 单位长度的质量, C_{pl} 为对应输电元件 l 的材料比热容, $I_l(t)$ 为 t 时刻输电元件 l 载流量, Q_a 和 Q_r 分别为热平衡方程中吸热和散热的抽象表达。上述相关运行量、参数及输电元件 t_0 时刻的初始温度均给定,实际可通过DTR技术测量得到,可见DTR技术是本文研究的基础。在热平衡方程参数通过DTR技术实测确定的情况下,令式(4)中左侧微分项为0即可得到输电元件在一定气象环境下的最大允许载流值(动态热定值),后续算例分析中的输电元件热定值即由此方法计算得到。

2.3 不等式约束

a. 输电元件温度约束。

$$T_l(t) \leq \bar{T}_l \quad l \in S_L, t \in [t_0, t_f] \quad (5)$$

其中, $\bar{T}_l$ 为输电元件 l 的最大允许温度。

b. 节点电压约束。

$$\underline{U}_i(t) \leq U_i(t) \leq \bar{U}_i(t) \quad i \in S_B, t \in [t_0, t_f] \quad (6)$$

其中, $\bar{U}_i(t)$ 、 $\underline{U}_i(t)$ 为 t 时刻节点 i 电压幅值的上、下限。

c. 发电机组输出功率约束。

$$P_{Gi}(t) \leq P_{Gi}(t) \leq \bar{P}_{Gi}(t) \quad i \in S_G \cup S_W \quad (7)$$

$$P_{Gi}(t) = 0 \quad i \in S_W \quad (8)$$

$$Q_{Gi}(t) \leq Q_{Gi}(t) \leq \bar{Q}_{Gi}(t) \quad i \in S_G \cup S_W \quad (9)$$

d. 发电机组功率调节速率约束。

$$-\bar{\mu}_{\downarrow} \Delta t \leq P_{Gi}(t) - P_{Gi}(t-1) \leq \bar{\mu}_{\uparrow} \Delta t \quad i \in S_G, t \in [t_0, t_f] \quad (10)$$

其中, $\bar{\mu}_{\uparrow}$ 、 $\bar{\mu}_{\downarrow}$ 分别表示节点 i 机组输出功率上调、下调最大允许速率,间接考虑了发电机组功率调节过程的惯性性质。

综上,在电网实时运行环境下,针对未来一段时

间的间歇式电源发电功率及负荷变化,式(1)—(10)构成 ETC 消纳间歇式能源发电的超前调度模型。

3 模型分析

在本文模型中,除常规的发电机组输出功率轨迹作为决策量外,间歇式能源发电功率及输电元件温度变化轨迹也是重要的决策量,并直接以温度不越限作为输电元件热载荷限值条件,以最小化电网发电成本及间歇式能源不完全消纳损失之和为目标,实现伴随间歇式能源发电变化过程的 ETC,其决策结果可能有如下 3 种情况。

- a. 在 $t_0 \sim t_f$ 时段内,电网完全消纳间歇式能源发电,同时输出通道输电元件的载流与温度均未达到限值。此时对应间歇式能源发电变化较为平稳的情况,输电元件载流变化在热定值以内,对消纳间歇式能源发电不构成制约。
- b. 在 $t_0 \sim t_f$ 时段内,电网完全消纳间歇式能源发电,同时输出通道输电元件温度在限值以下,但其载流超过热定值。此时间歇式能源发电变化较为剧烈,依据输电元件热定值已对电网消纳间歇式能源发电构成制约,但调度决策使用温度限制并实施 ETC 起到了提升电网消纳能力的效果,显现 ETC 效能。
- c. 在 $t_0 \sim t_f$ 时段内,电网未能完全消纳间歇式能源发电,输出通道输电元件载流超过其热定值,同时温度也达到限值。此时对应间歇式能源发电变化极为剧烈的情况,电网消纳受到载荷能力制约,但 ETC 同样起到了提升电网消纳能力的效果,使弃风、光等间歇式能源损失最小化。

4 算例分析

以下算例分析采用文献[16]中的 6 节点简单电网,并假设输电元件 1-2 处于检修状态,此时电网结构见图 1。设节点 2 为间歇式能源发电接入节点,通过输电线路 2-4、2-5、2-6 向负荷供电。该电网中输电元件及各节点的发电机组参数见表 1 和表 2,表中 R 、 X 、 B 分别为输电线路电阻、电抗和电纳的标幺

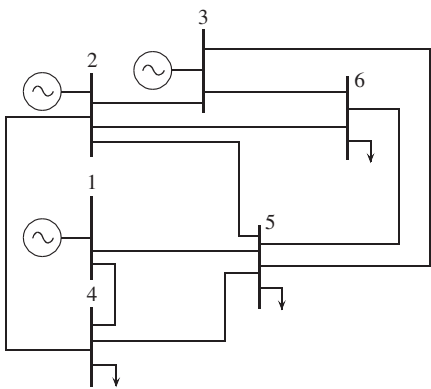


图 1 6 节点电网结构图
Fig.1 Structure of 6-bus power grid

值, R_w 为有功调整速率标幺值。节点 1、3 常规发电机组电发电成本函数系数见表 3。调度初始时刻的各节点发电功率、需求负荷由表 4 给出。该电网电压等级设为 110 kV,基准功率取 100 MV·A。各输电元件允许最高温度均为 70 ℃。各节点电压上、下限均取为 1.05 p.u.和 0.95 p.u.。设 DTR 实测热平衡方程参数如下:日照强度系数 14.08 W/m,对流散热系数 1.37 W/(m·℃),辐射散热系数 2.5×10^{-9} W/(m·℃),电阻-温度系数 0.0039 Ω/℃,环境温度 25 ℃。并由式(4)计算得到在此参数下各输电元件动态热定值见表 5。算例所得有功、无功、电流结果均为标幺值。

本文研究焦点在于通过 ETC 增强电网的静态输电能力,进而提升消纳间歇式能源发电能力。为说明 ETC 消纳间歇式能源发电的有效性同时保证算例系统的合理性,设计电网联系较为紧密,输电线路长度均为 100 km 以下(见表 1),决定了电网中输电元件载荷能力主要受热制约。热限制是输电元件载荷能力的物理限制,是对载荷能力挖掘利用的本质所在。当前电网输电技术的发展正逐步使长距离输电线路及断面达到热限制,如对于间歇式能源发电通过长距离传输到负荷中心的情况可通过无功补偿、FACTS,甚至直流输电技术以使输电元件载荷能力突破功角稳定、电压水平制约达到热限制水平。

取 $t_0 \sim t_f$ 时段长度为 30 min, $\tau = 5$ min,将整个研

表 1 电网参数
Tab.1 Parameters of power grid

首节点	末节点	R	X	$B/2$	输电线路长度/km	$m_l C_{pl}/[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	初始温度/℃
1	4	0.08	0.20	0.010	60	545	39.7
1	5	0.08	0.30	0.016	90	853	36.2
2	3	0.05	0.26	0.014	80	1127	33.6
2	4	0.05	0.10	0.005	30	444.5	53.9
2	5	0.10	0.30	0.016	90	711.3	35.6
2	6	0.07	0.22	0.011	65	711.3	35.0
3	5	0.12	0.24	0.012	70	444.5	38.3
3	6	0.02	0.10	0.005	30	1127	39.2
4	5	0.02	0.10	0.005	30	1127	33.6
5	6	0.10	0.30	0.016	90	711.3	34.0

表 2 机组节点数据
Tab.2 Data of generating units

发电机组节点号	P_{Gmax}	P_{Gmin}	Q_{Gmax}	Q_{Gmin}	R_{ui}
1	2.5	0.500	2.00	-0.20	0.08
2	3.0	0	1.86	-0.25	—
3	2.0	0.450	2.00	-0.20	0.04

表 3 发电机组节点成本函数系数及间歇式
能源不完全消纳惩罚系数

Tab.3 Cost function coefficient of generating unit
nodes and penalty coefficient for incomplete
accommodation of intermittent energy

节点	$a_i/(\$/\text{MW}^2)$	$b_i/(\$/\text{MW}^{-1})$	$\alpha_i/(\$/\text{MW}^{-1})$
1	0.002	2.00	—
2	—	—	100
3	0.003	3.25	—

表 4 各节点初始注入功率

Tab.4 Initial power injection of each node

节点	有功注入	无功注入	节点	有功注入	无功注入
1	0.88	0.29	4	-1.20	-0.30
2	1.20	0.48	5	-1.08	-0.50
3	1.00	0.38	6	-0.70	-0.35

表 5 给定热平衡方程参数下线路热定值

Tab.5 Thermal ratings under given meteorological
parameter of HBE

首节点	末节点	热定值电流	首节点	末节点	热定值电流
1	4	1.07	2	6	1.22
1	5	1.35	3	5	0.98
2	3	1.55	3	6	1.55
2	4	0.98	4	5	1.55
2	5	1.22	5	6	1.22

究时段分为 6 个时段。在上述条件下,给出 3 种场景下间歇式能源发电节点 2 的有功功率预测曲线如图 2 所示,6 个时段内负荷节点功率均呈上升趋势,各节点具体负荷预测功率见表 6。

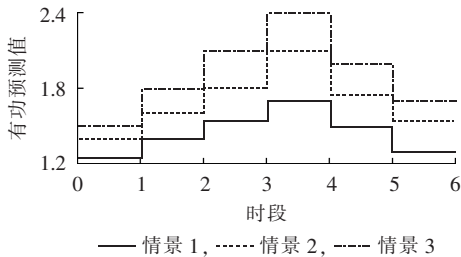


图 2 3 种情景下节点 2 间歇式能源发电有功功率曲线
Fig.2 Active power curves of intermittent power
generation at node 2 under three cases

4.1 情景 1

由图 2 可见,此情景对应间歇式能源发电变化最为平缓的情况,此时本文模型对 6 个时段调度决策结果如表 7 所示,所得目标值为 \$3332。关键输电线路 2-4 载流及温度变化如图 3 所示。

由表 7 可见,在第 1—4 时段间歇式能源发电持续上升的过程中,成本较高的节点 3 发电机组输出功

表 6 6 个时段有功负荷值
Tab.6 Active power load of 6 periods

时段	有功负荷		
	节点 4	节点 5	节点 6
1	1.3	1.08	0.70
2	1.4	1.09	0.72
3	1.5	1.10	0.74
4	1.6	1.11	0.75
5	1.7	1.12	0.77
6	1.8	1.13	0.79

表 7 情景 1 本文模型 6 个时段调度决策结果

Tab.7 Results of dispatch for 6 periods by
proposed model in case 1

时段	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}
1	1.16	1.25	0.80
2	1.36	1.40	0.60
3	1.51	1.55	0.45
4	1.48	1.70	0.45
5	1.85	1.50	0.45
6	2.23	1.30	0.45

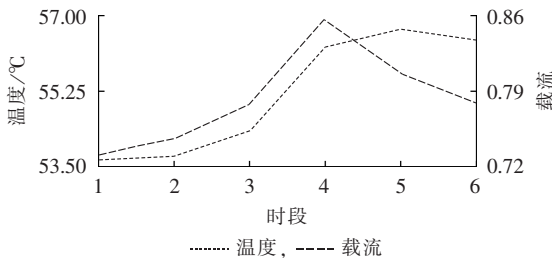


图 3 情景 1 输电线路 2-4 温度及载流变化曲线
Fig.3 Temperature and current curves of
transmission line 2-4 in case 1

率一直配合下调至下限,全网负荷增量由间歇式电源和成本较低的节点 1 发电机组承担,此时为节点 4 负荷供电的间歇式电源关键送出线路 2-4 的载流与温度处于上升状态(如图 3 所示),但载流并未达到其 DTR(0.98 p.u.),同时温度也未达到限值,说明整个调度过程并未受限于输电元件载荷能力,此时采用热电流或温度限制不影响调度的决策结果,在整个调度时段内间歇式能源发电被完全消纳。在第 5、6 时段间歇式能源发电出现下降,此时全网负荷仍在增长,调度将成本较低的节点 1 发电机组输出功率上调以满足负荷需求,输电线路 2-4 载流随之下降,温度随载流的下降先是增速减缓而后下降。

4.2 情景 2

对应间歇式能源发电变化较为剧烈的情况,此时 6 个时段调度结果见表 8,所得目标值为 \$2930。关键输电线路 2-4 载流及温度变化如图 4 所示。

与情景 1 类似,在第 1—4 时段节点 3 发电机组输出功率被下调至下限,由于间歇式能源发电增长较快,节点 1 发电机组在第 4 时段也出现了明显下调。此时间歇式能源发电关键送出线路 2-4 的载流与温

表 8 情景 2 本文模型 6 个时段调度决策结果
Tab.8 Results of dispatch for 6 periods by
proposed model in case 2

时段	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}
1	1.01	1.40	0.80
2	1.15	1.60	0.60
3	1.25	1.80	0.45
4	1.08	2.10	0.45
5	1.57	1.75	0.45
6	1.94	1.56	0.45

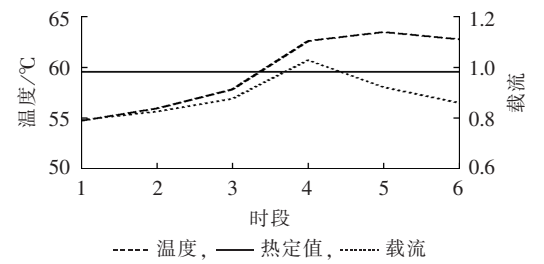


图 4 情景 2 输电线路 2-4 温度及载流变化曲线
Fig.4 Temperature and current curves of
transmission line 2-4 in case 2

造成的功率缺额(见表 9),将输电线路 2-4 的温度控制在 70℃ 以下。虽然本场景消纳了更多的间歇式能源发电,但由于存在不完全消纳,目标中的惩罚项使目标函数出现明显上升,目标值达到 \$4152。

表 9 情景 3 本文模型 6 个时段调度决策结果
Tab.9 Results of dispatch for 6 periods by
proposed model in case 3

时段	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}
1	0.91	1.50	0.80
2	0.95	1.80	0.60
3	0.95	2.10	0.45
4	0.83	2.36	0.45
5	1.23	1.90	0.65
6	1.64	1.70	0.58

5 结论

本文针对间歇式电源并网运行条件下的电网消纳问题,引入 ETC 理论,分析了 ETC 增强电网消纳能力的机理,并通过建立数学模型和算例分析验证了有效性,结论如下。

a. 间歇式电源并网运行使电网潮流波动加剧,输电元件载流与温度变化的不同步性更为凸显,在这一背景下实施 ETC 有其重要意义和现实价值。

b. ETC 显现输电元件能力的本质,能够充分利用输电元件载流与温度变化的不同步性,缓解间歇式能源发电输出通道的载荷能力制约,有效增强电网消纳间歇式能源发电能力。

c. DTR 技术是 ETC 实施的基础,ETC 是对 DTR 系统的有效补充和附带利用。对引入 DTR 技术的间歇式能源送出通道中的关键输电元件实施 ETC 有利于提升 DTR 功效。

本文研究初步揭示了 ETC 提升电网消纳间歇式能源发电能力的机理,后续将进一步研究引入 ETC 后的间歇式能源消纳涉及的复杂问题。

参考文献:

[1] 朱凌志,陈宁,韩华玲. 风电消纳关键问题及应对措施分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):29-34.
ZHU Lingzhi,CHEN Ning,HAN Hualing. Key problem and solutions of wind power accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(22):29-34.
[2] 杨东,刘玉田. 中国未来输电网架结构初探[J]. 电力自动化设备,2010,30(8):1-5.
YANG Dong,LIU Yutian. Preliminary discussion on China transmission backbone in the future[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(8):1-5.
[3] 刘德伟,黄越辉,王伟胜,等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化,2011,35(22):77-81.
LIU Dewei,HUANG Yuehui,WANG Weisheng,et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(22):77-81.

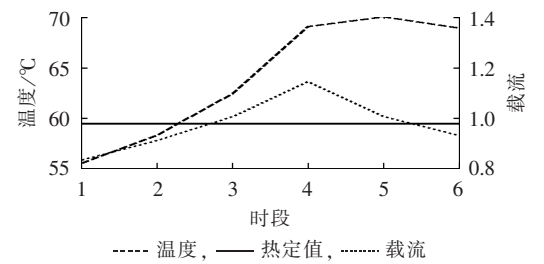


图 5 情景 3 输电线路 2-4 温度及载流变化曲线
Fig.5 Temperature and current curves of
transmission line 2-4 in case 3

- [4] 穆钢,崔杨,严干贵. 确定风电场群功率汇聚外送输电容量的静态综合优化方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(1):15-19.
MU Gang,CUI Yang,YAN Gangui. A static optimization method to determine integrated power transmission capacity of clustering wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(1):15-19.
- [5] 穆钢,崔杨,刘嘉,等. 有待风电机组且传输受限电网的源网协调调度方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):24-29.
MU Gang,CUI Yang,LIU Jia,et al. Source-grid coordinated dispatch method for transmission constrained grid with surplus wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(6):24-29.
- [6] KAZEROONI A K,MUTALE J,PERRY M,et al. Dynamic thermal rating application to facilitate wind energy integration[C]//2011 IEEE Trondheim PowerTech. Trondheim,Norway:[s.n.],2011:1-7.
- [7] RINGELBAND T,LANGE M,DIETRICH M,et al. Potential of improved wind integration by dynamic thermal rating of overhead line[C]//2009 IEEE Bucharest PowerTech. Bucharest,Romania:[s.n.],2009:1-5.
- [8] JUPE S C E,KADAR D,MURPHY G,et al. Application of a dynamic thermal rating system to a 132 kV distribution network[C]//2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies(ISGT Europe). Manchester,England:[s.n.],2011:1-8.
- [9] BANAKAR H,ALGUACIL N,GALIANA F D. Electrothermal coordination part I:theory and implementation scheme[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(2):798-805.
- [10] ALGUACIL N,BANAKAR H,GALIANA F D. Electrothermal coordination part II:case studies[J]. IEEE Trans on Power Systems,2005,20(2):1738-1745.
- [11] 陈芳,韩学山,康凯,等. 基于SCADA信息追踪输电线路动态热定值[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):81-85.
CHEN Fang,HAN Xueshan,KANG Kai,et al. Tracking of dynamic thermal rating of transmission line based on SCADA[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5):81-85.
- [12] 丁希亮,韩学山,张辉,等. 电热协调潮流及输电线路温度的变化过程分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(19):138-144.
DING Xiliang,HAN Xueshan,ZHANG Hui,et al. Analysis on electrothermal coordination power flow and transmission line temperature variation process[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(19):138-144.
- [13] 王孟夏,韩学山,杨朋朋,等. 计及电热耦合的动态最优潮流模型与算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(3):28-32.
WANG Mengxia,HAN Xueshan,YANG Pengpeng,et al. Dynamic optimal power flow model considering electro-thermal coupling and its algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(3):28-32.
- [14] 白永祥,房大中,侯佑华,等. 调度中心大规模风电场实时在线监控系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):6-8.
BAI Yongxiang,FANG Dazhong,HOU Youhua,et al. Real-time online monitoring and control system in dispatch center for large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):6-8.
- [15] 韩学山,杨明,张利. 价值调度推进智能电网发展的思考[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):5-9.
HAN Xueshan,YANG Ming,ZHANG Li. Contemplation of smart grid development promoted by value based dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(2):5-9.
- [16] WOOD A J,WOLLENBERG B F. Power generation,operation and control[M]. 北京:清华大学出版社,2003:104.

作者简介:

王孟夏(1983-),男,黑龙江佳木斯人,博士后,研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:wangmx83@163.com);

韩学山(1959-),男,辽宁大连人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统优化调度、EMS、电力市场领域的研究和教学工作;

孙宏斌(1969-),男,浙江天台人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统调度自动化领域的研究和教学工作。

Improving intermittent energy accommodation capability of power grid based on electro-thermal coordination theory

WANG Mengxia¹,HAN Xueshan²,SUN Hongbin¹

(1. Department of Electrical Engineering,Tsinghua University,Beijing 100084,China;

2. School of Electrical Engineering,Shandong University,Shandong 250061,China)

Abstract: A method based on electro-thermal coordination theory is proposed to improve the intermittent energy accommodation capability of power grid. A power grid accommodation model with electro-thermal coordination is built,which,combined with the intermittent energy generated power and load forecasting technique,considers the electro-thermal coupling law of transmission components in the advanced dispatch,takes the maximum permissible temperature as the thermal load-carrying limit of transmission components,and coordinates the current-temperature coupled dynamic process of transmission components during the fluctuating intermittent energy power generation. The asynchronization between current and temperature changes is used in advance to mitigate the current-dependent load-carrying capacity tension of transmission components and thus improve the intermittent energy accommodation capacity of power grid. Results of case analysis verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: electric power systems; electro-thermal coordination; transmission capability; intermittent power generation; transmission component; models