Ð

# 含风电场的电力系统动态优化潮流

聂永辉1. 冯浩然2. 于永利3. 王中杰2

(1. 东北电力大学 教务处,吉林 吉林 132012;2. 东北电力大学 电气工程学院,吉林 吉林 132012;

3. 吉林石化分公司精细化学品厂,吉林 吉林 132022)

摘要:为了体现风电的环境价值,建立电力市场环境下大规模异步风电并网电力系统动态最优潮流模型。首先计算风电场功率输出期望值,在此基础上,引入基于风电场极限穿透功率的风电弃风运行惩罚成本 (WAOPC)以处理弃风行为;然后考虑火电机组的排污特性,并用名义环境补偿成本(NECC)来量化火电环境 成本;最后引入风电备用成本(RCCC)来处理随着系统风电穿透水平增加而引起的系统二次备用上升。仿真 表明,所建立的模型既考虑了电能生产所产生的环境污染和资源消耗等外部成本,同时也计及了因弃风行为 造成的风电损失,合理地反映了以风电能源形式的电能价值。

关键词: 电力系统; 风电; 风电环境价值; 风电场弃风运行惩罚成本; 名义环境成本; 动态最优潮流

中图分类号: TM 744; TM 614 文献标识码: A

## 0 引言

目前,以风电为代表的可再生能源得到了快速 发展<sup>[1-2]</sup>,研究含风电并网的大规模电力系统优化运 行问题是一个基础而又重要的课题<sup>[3]</sup>。各国学者主 要采用 2 种方法应对风电本身具有的不确定性:一 种方法是基于风电功率预测的大规模风电并网电力 系统优化求解,为减少风电不确定性,已有多种方法 用来提高对未来时间段内风电机组功率出力预测 的准确性<sup>[4-6]</sup>;另一种是在最优模型中考虑到这种不 确定性的影响,即采用期望值模型、机会约束规划和 相关机会规划等不确定性的理论和方法来研究大规 模风电接入下的优化运行问题<sup>[7-9]</sup>。

风力发电不需要消耗石油、煤炭等非可再生能 源,可以节省燃料成本,具有保护环境价值。如果优 化潮流模型没有考虑传统火电机组环境成本,将造 成部分电源的环境价值被无偿占有,这不仅阻碍了 可再生能源的发展,不能合理反映以风电为代表的 新能源环境价值,而且使得污染比较严重的传统能 源过度发展,加重了环境污染程度。另一方面,由于 风能具有波动性、间歇性和随机性等特点,为保证电 网频率的变化在允许的范围内,调度部门常以此为 借口决策风电场弃风运行,降低了风电的利用效率, 造成风能资源浪费<sup>[2]</sup>。

为使风电环境价值得到合理的反映,国内外研 究人员对含风电的优化计算问题进行了大量的研

收稿日期:2016-01-21:修回日期:2016-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577023,51307018); 东北电力大学博士科研启动基金资助项目(BSJXM-201409) Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51577023,51307018) and the Doctoral Scientific Research Foundation of Northeast Electric Power University (BSJXM-201409) 究。文献[3]考虑了风电功率的波动性和难以预测性 对动态经济调度旋转备用的新要求,引入了正、负旋 转备用约束,将火电机组阀点效应引入到发电总成 本中,使得优化模型更趋合理。文献[10]从发电收 益、发电成本、辅助服务成本、环保效益等各方面因 素考虑风力并网发电的价值。文献[11]引入和可利 用的风能与实际发出的风能之差成正比的惩罚成 本,然后转化成和风能概率密度相关的积分形式来 表示风能的随机性,仿真表明引入惩罚成本确保了 风能得到充分利用。文献[12]采用随机模拟技术分 析风电并网对电力系统运行方式和发电成本的影响 规律。文献[13]通过计算下一调度日风电场实际出 力的条件期望与计划出力的差值,确定了风电对系 统正、负旋转备用的需求。

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.02.003

可以看出,上述文献并未考虑弃风损失。本文 风电场采用笼型异步风力发电机组,在风电场功率输 出预估基础上,引入基于极限穿透功率的风电场弃风 运行惩罚成本(WAOPC)来度量由于风电场弃风行 为而造成的功率损失;引入风电备用成本(RCCC)来 处理随着系统风电穿透水平增加而引起的系统备用 上升;同时考虑火电名义环境补偿成本(NECC)来度 量常规能源在发电时污染环境所带来的成本。因 此,在电力市场环境下,考虑风电特性、能源利用效 率、整个系统运行及环境保护等因素,建立大规模 风电并网动态优化潮流新模型。该模型考虑电能生 产中的环境污染和资源消耗等外部成本,引入了弃风 成本,使以风电为代表的新能源价值得到合理的体现。

#### 1 异步风电机组建模

笼型异步发电机在超同步速运行情况下以发电 方式运行,此时吸收风力机提供的旋转机械能,输出 有功功率,但其自身没有励磁装置,因此没有电压调 节功能,需从电网吸收无功功率提供其建立磁场所 需的励磁电流,为了减小风电场并网运行对系统电 压分布的影响,一般在笼型异步风电机组机端安装 并联电容器组以补偿无功损耗,其简化等值电路如 图1所示。图中,忽略定子电阻,x1为定子漏抗,xm为 激磁电抗,x2为转子漏抗,s为转差率,r2为转子电 阻。当图中功率参考方向采用发电方式时,可以推 出下面的功率表达式:

$$P_{\rm W} = \frac{U^2 r_2 s}{s^2 x^2 + r_2^2} \tag{1}$$

$$Q_{\rm W} = -\frac{U^2}{x_{\rm m}} + \frac{P_{\rm W}x}{r_2}s$$
 (2)

其中,*x*=*x*<sub>1</sub>+*x*<sub>2</sub>。

由上述两式可推出无功功率为:



#### 图 1 异步风力发电机的简化等值电路

Fig.1 Simplified equivalent circuit of asynchronous wind-power induction generator

风力发电机输出功率和风速的函数关系采用分 段函数表示为<sup>[7]</sup>:

$$P_{W} = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \vec{x} \ v \ge v_{co} \\ f(v) & v_{ci} \le v < v_{r} \\ P_{r} & v_{r} \le v < v_{co} \end{cases}$$
(4)

其中, v<sub>ci</sub>、v<sub>r</sub>、v<sub>co</sub>分别为风机切入风速、额定风速和切出风速; P<sub>w</sub>为风机有功功率输出; P<sub>r</sub>为风机额定功率输出; f(v)一般采用一次函数表达式来近似表示。

在某一时段,风机输出功率可用其期望值 Pwr来近似,即将典型日风速分布曲线转化成典型日功率分布曲线,利用下式求解得出:

$$P_{\rm WF} = \int_{t_0}^{t_1} P_{\rm W} dt / (t_1 - t_0)$$
 (5)

其中,t<sub>0</sub>和t<sub>1</sub>分别为某时段的起始时刻和终止时刻。

## 2 大规模异步风电并网动态优化潮流建模

#### 2.1 基于风电场出力预估的风电备用容量补偿成本

风电并网所增加的备用容量是由于风能的随机 性引起的,从而导致风电场预报出力与实际出力存 在偏差,因此风电并网所增加的备用容量费用可表 示为:

$$F_{\text{RCCC}} = \sum_{j=1}^{n_{\text{W}}} C_{\text{RCCC}j} (P_{\text{W}j} - P_{\text{WF}j})$$
(6)

其中, CRCCG 为风电备用容量补偿成本系数, 其值与

提供备用容量的火电机组的排污特性有关;Pwvj为第 j个风电场的输出功率的期望值;Pwj为第j个风电场 计划调度出力;nw为风电场个数。

## 2.2 基于极限穿透功率的风电场弃风运行惩罚成本

风电极限穿透功率是指风电场装机容量占系统 总负荷的比例。其是从整个电力系统出发,表明一个 给定电网可以承受的最大风电容量大小,旨在考虑 在风电投入和退出运行的2种情况下,电力系统的 可调节容量应能保证电网频率的变化在允许的范围 内<sup>[2]</sup>。这就使得调度部门常以此为借口决策风电场 弃风运行,降低了风电的利用效率,造成风能资源浪 费。定义由于调度原因造成的风电场弃风行为为风 电场弃风运行,在定义的基础上,提出了基于风电场 极限穿透功率的风电场弃风运行惩罚成本,即:

$$F_{\text{WAOPC}} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n_{\text{W}}} C_{\text{WAOPC}j}(P_{\text{WF}j} - P_{\text{W}j}) & P_{\text{WF}j} < P_{\text{W}j}^{\text{WPP}} \\ \sum_{j=1}^{n_{\text{W}}} C_{\text{WAOPC}j}(P_{\text{W}j}^{\text{WPP}} - P_{\text{W}j}) & P_{\text{WF}j} \ge P_{\text{W}j}^{\text{WPP}} \end{cases}$$
(7)

其中, F<sub>WAOPC</sub> 为总的风电场弃风运行惩罚成本; P WF 为第 j 个风电场的装机容量, 虽然风电极限穿越功率 为一个全网的概念, 但其是指所有风电场装机容量 之和占系统总负荷的比例, 本文中将 P WF 定义为第 j 个风电场的极限穿越功率; C<sub>WAOPCj</sub> 为第 j 个风电场弃 风运行惩罚价格系数。

## 2.3 火电名义环境补偿成本

常规能源在生产电能时会释放各种污染气体及 颗粒,对环境造成了巨大的危害。然而电力系统常规 最优潮流模型没有体现火电的环境成本,从而制约 了洁净能源的发展。在体现火电购电成本的传统优 化模型基础上,根据火力发电机组的排污特性,增加 火电机组的环境补偿成本,这个附加的成本在机组 的调度优先权中体现,并不附加在消费者的购电费 用中,因此将该成本定义为火电机组的名义环境补 偿成本。

火电机组的名义环境补偿成本表示为:

$$F_{\text{NECC}} = \sum_{i=1}^{n_c} C_{\text{NECC}i} f_{ei} \tag{8}$$

其中, $F_{\text{NECC}}$ 为总的火电机组的名义环境补偿成本;  $n_{\text{C}}$ 为系统中的火电机组数目; $C_{\text{NECC}i}$ 为火电名义环境 补偿成本价格系数; $f_{ei}$ 为排污特性方程,其是通过将 单位时间内火电机组排放的各种污染物折算成 NO<sub>x</sub> 的重量来表示, $f_{ei}$ 的表达式为:

$$f_{ei} = \alpha_i + \beta_i P_{Gi} + \gamma_i P_{Gi}^2 + \zeta_i \exp(\lambda_i P_{Gi})$$
(9)

其中, $P_{Gi}$ 为第*i*台火电机组的出力; $\alpha_i$ 、 $\beta_i$ 、 $\gamma_i$ 、 $\zeta_i$ 、 $\lambda_i$ 为第*i*台火电机组的排污特性系数,可通过测量-拟合得到。

#### 2.4 大规模异步风电并网动态优化潮流新模型

#### 2.4.1 目标函数

为体现传统火电机组环境成本和风电机组的环 境价值,本文采用火电名义环境补偿成本来度量常 规能源在发电时污染环境所带来的成本;在风电场 功率输出预估基础上,引入基于极限穿透功率的风 电场弃风运行惩罚成本来度量由于风电场弃风行为 而造成的功率损失;同时,引入风电备用成本来处理 随着系统风电穿透水平增加而引起的系统备用上 升。因此,在电力市场环境下,考虑风电特性、能源利 用效率、整个系统运行及环境保护等因素,以火力发 电机有功出力和无功出力、异步风电机组的有功出 力、并联无功补偿装置的无功输出、节点电压实部和 虚部以及有载调压变压器变比为优化变量,建立了 大规模风电并网动态优化潮流新模型。该模型的目 标函数可表示为:

 $\min F^{(i)} = F^{(i)}_{RCC} + F^{(i)}_{WADPC} + F^{(i)}_{MOPC} + F^{(i)}_{MOPC} + F^{(i)}_{CCP}$  (10) 其中,*t* 代表调度时段; $F^{(i)}$  为系统总的成本费用,由风 电备用容量补偿成本  $F^{(i)}_{RCC}$ 、基于极限穿透功率的风 电场弃风运行惩罚成本  $F^{(i)}_{WADPC}$ 、风电场营运成本  $F^{(i)}_{WOP}$ 、 火电机组的名义环境补偿成本  $F^{(i)}_{NECC}$ 、火电营运成本  $F^{(i)}_{COP} 5$ 个部分组成。

风电机组的营运成本包括风电的投资成本和运行成本。在整个寿命周期内,可表示为与风电发电出力呈线性关系<sup>[2]</sup>:

$$F_{\rm WOP} = \sum_{j=1}^{n_{\rm W}} C_{\rm WOPj} P_{\rm Wj} \tag{11}$$

其中, Cwopy 为第 j 个风电场营运成本系数。

火电营运成本考虑火电投资、能量消耗和运行 维护等成本,可表示为<sup>[2]</sup>:

$$F_{\rm COP} = \sum_{i=1}^{n_{\rm C}} a_i P_{\rm Gi}^2 + b_i P_{\rm Gi} + c_i \tag{12}$$

其中,*a<sub>i</sub>、b<sub>i</sub>、c<sub>i</sub>*为与火力发电机组的耗量特性有关的 火电机组的购电成本特性系数,可根据火电机组的 报价曲线来确定。

2.4.2 等式约束

基于风电场期望值和异步发电机电压与无功方程(3),动态优化潮流必须满足每个调度时段的第*i* 个交流潮流平衡方程,可表示为:

g(P<sup>@</sup><sub>1</sub>,Q<sup>@</sup><sub>2</sub>,P<sup>@</sup><sub>3</sub>,Q<sup>@</sup><sub>3</sub>,Q<sup>@</sup><sub>4</sub>,e<sup>@</sup><sub>1</sub>,f<sup>@</sup><sub>1</sub>,k<sup>@</sup><sub>1</sub>)=0 (13) 其中,P<sup>®</sup><sub>3</sub>为笼型异步风电机组的有功计划出力;Q<sup>@</sup><sub>3</sub>为由式(3)表示的笼型异步风电机组的无功需求,是 关于笼型异步风电机组机端电压和有功出力的函数; P<sup>®</sup><sub>2</sub>和Q<sup>®</sup><sub>4</sub>分别为火力发电机有功和无功出力;Q<sup>@</sup><sub>6</sub>为 并联补偿装置无功出力,包括风电场的无功补偿出力; e<sup>@</sup><sub>1</sub>和f<sup>@</sup><sub>1</sub>分别为节点电压的实部和虚部;k<sup>@</sup>为有载 调压变压器变比。对于通过风电汇集升压站接入公 共电网的风电场,配置容性无功补偿容量能补偿风 电场满发时送出线路上的无功损耗;配置感性无功 补偿容量能补偿风电场空载时送出线路上的充电功 率。风电场无功补偿装置容量总和一般不小于风电 装机容量的 30%~50%。

2.4.3 不等式约束

不等式约束包括节点电压幅值、火电发电机有 功出力和无功输出、风电机组有功输出、并联无功补 偿输出(包括风电接入点的并联无功补偿出力)、有 载调压变压器变比和支路负载的上下限约束限制及 火电机组的爬坡速率约束。分别表示为:

$(U_i^{\min})^2/2 \leq (U_i^{(t)})^2/2$	$2 \leq (U_i^{\max})^2/2$	$i=1,2,\cdots,n$	(14)
$P_{Gi}^{\min} \! \leqslant \! P_{Gi}^{(t)} \! \leqslant \! P_{Gi}^{\max}$	$i = 1, 2, \cdots, n_{\rm G}$		(15)
$Q_{\mathrm{G}i}^{\mathrm{min}} \leq Q_{\mathrm{G}i}^{(t)} \leq Q_{\mathrm{G}i}^{\mathrm{max}}$	$i = 1, 2, \cdots, n_{\rm G}$		(16)
$P_{\mathrm{W}i}^{\min} \! \leqslant \! P_{\mathrm{W}i}^{\scriptscriptstyle(t)} \! \leqslant \! P_{\mathrm{W}i}^{\max}$	$i = 1, 2, \cdots, n_{W}$		(17)
$Q_{\mathrm{C}i}^{\mathrm{min}} \leq Q_{\mathrm{C}i}^{(t)} \leq Q_{\mathrm{C}i}^{\mathrm{max}}$	$i = 1, 2, \cdots, n_{\rm C}$		(18)
$k_i^{\min} \leq k_i^{(t)} \leq k_i^{\max}$	$i = 1, 2, \cdots, n_{\rm T}$		(19)
$\left[ (e_{i}^{(t)} - e_{j}^{(t)})^{2} + (f_{i}^{(t)} - e_{j}^{(t)})^{2} + ($	$-f_{j}^{(t)})^{2}]/2 \leq (r_{ij}^{2} +$	$(x_{ij}^2)(I_{ij}^{\max})^2/2$	

$$i=1,2,\cdots,n_{\rm B} \tag{20}$$

 $-r_{i}^{down}\Delta T(s) \leq P_{Gi}^{(t)} - P_{Gi}^{(t-1)} \leq r_{i}^{up}\Delta T(t)$  (21) 其中, $r_{i}^{up}$ 和 $r_{i}^{down}$ 分别为第i台火电机组的上升和下降 速率; $\Delta T(t)$ 为调度时段的时间间隔; $n, n_{G}, n_{W}, n_{C}, n_{T},$  $n_{B}$ 分别为节点、常规发电机、风电场、并联无功补偿

装置和支路数量; $r_{ij}$ , $x_{ij}$ 分别为支路电阻、电抗; $I_{ij}^{max}$ 为 支路电流的上限。

在不等式约束中,只包含了笼型异步风力发电 机组有功出力的上下限约束,而没有包含其无功需 求的上下限约束,这是因为其无功需求通过式(1)、 (2)可表示为端电压和转速的函数,当转速固定时, 无功需求随着端电压的升高而升高。因此,当风电 机组稳定运行时,可利用端电压的约束限制无功需 求的范围。

本文所论述的风火电运行成本建模中,各成本 系数的取值反映了各个成本因素在总成本费用中的 权重关系。该模型既考虑了传统电力生产所带来的 环境污染和资源消耗等外部成本,同时也计及了因 弃风行为造成的风电损失,使以风电为代表的新能 源形式的电能价值得到合理的反映。本文利用预测 校正原对偶内点法实现上述优化问题,关于该算 法的介绍详见文献[14-15],这里不再赘述。

#### 3 算例仿真

本文对 IEEE 30 节点标准测试系统进行修改, 将风电场通过升压变压器和 1 号节点相连,风电 场容量为 20×2 MW,风电场无功补偿装置容量为 12 Mvar,风力机的切入风速、额定风速和切出风速 分别为 3、14、20 m/s,异步风力发电机的定子阻抗为 j0.099 85 p.u.,转子阻抗为 0.003 73 + j0.109 06 p.u., 励磁电抗为 3.547 08 p.u., 调度时段间隔为 30 min, 设火电机组上升和下降速率相等, 对于 2、22、27、23、 13 号节点所连接的火电机组的爬坡速率分别为 0.30、0.24、0.18、0.24、0.30 MW/min。为方便起见,本 文用文献[7]中式(4)、(5)得出的风电场有功功率期 望值计算结果, 共包含 5 个时段, 各时段的计算结果 分别是 40、28、17、0、10 MW。首先对第 2 个时段进 行静态优化求解, 以研究各个成本系数对机组调度 权的影响, 然后对所建动态优化建模型进行求解。另 外, 本文各成本系数按比例采用相对价格进行仿真。

3.1 风电购电成本系数变化对机组出力的影响

设风电备用容量成本、弃风运行惩罚成本和火 电名义环境补偿成本系数为0。风电购电成本系数 变化时,各机组出力(标幺值,后同)的仿真优化结果 如图 2(a)所示。由图可知,在传统的价格机制下,不 考虑各机组的名义环境补偿成本时,对环境破坏大 的机组反而拥有更大的调度优先权,火电机组2一 直处于满负荷状态运行(该机组额定出力为 0.8 p.u.); 风电购电成本系数大于 3.1 时,除火电机组 4 外,其 他所有火电机组都获得不同容量的有功出力,而风 电机组却处于停运状态,只有当购电成本系数降到 足够低的水平时才能获得调度权。图 2(b)显示了风 电购电成本系数变化对优化后总成本的影响,风电 购电成本系数小于 2.9 左右时,优化后总成本随着风 电购电成本系数变化缓慢地呈线性增加,但风电 购电成本系数大于 2.9 左右时,优化后总成本随着 风电购电成本系数变化大幅度地增加,最后稳定 在 673.8239 \$/h 不变。





3.2 火电机组名义环境补偿成本系数变化对机组 出力的影响

设风电备用容量补偿成本和弃风运行惩罚成本 系数为0,风电运营成本系数为1。火电机组名义环 境补偿成本系数变化时,各机组出力仿真优化结果 如图 3(a)所示。由图可知,机组 3、5 和 6 的调度出力 随名义环境补偿成本系数的提高而降低,对环境更 友好的火电机组2、3一直处于满发状态,当名义环 境补偿成本系数为2.6时,风电机组由于火电机组名 义环境补偿成本的增加而获得了调度权。总之.一方 面,名义环境补偿成本改变了火电机组的调度权;另 一方面,名义环境补偿成本赋予风电等环境友好的 可再生能源调度优先权,确保风电的优先发展。图3 (b)显示了名义环境补偿成本系数对优化后总成本 的影响,可以看出优化后总成本曲线是一条不光滑 曲线,这是排污特性方程非线性项作用的结果,当火 电机组名义环境补偿成本系数达到 2.6 左右时,优 化后总成本大幅度下降。



图 5 名文环境科层成本系数变化对机组面刀的影响 Fig.3 Influence of NECC coefficient on unit output

# 3.3 风电备用容量补偿成本系数变化对机组出力 的影响

设火电机组名义环境补偿成本系数为0,风电弃 风运行惩罚成本系数为2,风电运营成本系数为2.2。 风电备用容量补偿成本系数变化时各机组优化分配 仿真结果如图4(a)所示。由图可知,当风电备用容量 补偿成本系数比较小时,对环境更友好的机组2、 3和风电机组获得优先调度权而处于满发状态,由 于没有考虑火电机组名义环境补偿成本,所有机组 出力固定不变,但当风电备用容量补偿成本系数达 2.7 左右时,由于风电备用容量补偿成本的影响,风 电出力下降,其他未满发的火电机组出力上升。图 4 (b)显示了风电备用容量补偿成本系数变化对优化 后总成本的影响,风电备用容量补偿成本系数小于 2.7 左右时,优化后总成本固定不变,但风电备用容 量补偿成本系数大于 2.7 左右时,优化后总成本随着 风电购电成本系数变化大幅度地增加。



Fig.4 Influence of wind-power RCCC coefficient on unit output

# 3.4 风电弃风运行惩罚成本系数变化对机组出力 的影响

火电名义环境补偿成本、备用容量补偿成本和 风电运营成本系数分别为 0、2 和 2.2 时,风电弃风运 行惩罚成本系数变化时各机组优化仿真结果如图 5 (a)所示。由于风电备用容量补偿成本和风电运营成 本的作用,风电机组在风电弃风运行惩罚成本系数 比较小时未获得调度权,当风电弃风运行惩罚成本系数 比较小时未获得调度权,当风电弃风运行惩罚成本系数 达到 1.1 时,风电机组获得调度权并处于满发状 态,可防止调度部门以穿透功率为借口导致弃风行为; 由于没有考虑火电机组名义环境补偿成本,对环境 更友好的机组 2、3 获得优先调度权而处于满发状 态,而其他能耗大的机组处于降额运行。图 5(b)显 示了风电弃风运行惩罚成本系数变化对优化后总成 本的影响,可以看出,优化后总成本随着风电弃风运 行惩罚成本系数的增加而降低,这充分体现了风电 机组的环境价值,确保风电机组的优先发展。

# 3.5 所建动态优化模型仿真分析

本文采用文献[7]中式(4)、(5)求取的风电场功



Fig.5 Influence of WAOPC coefficient on unit output

率期望值对所建动态优化模型进行求解,风电场功 率期望值计算结果共包含5个时段,各时段的计算 结果分别是 40、28、17、0、10 MW。设火电机组名义 环境补偿成本系数为1.风电备用容量补偿成本系数 为2,风电运营成本系数为2.2,仿真风电弃风运行 惩罚成本系数对机组出力的影响,仿真结果如表1所 示,表中有功功率为标幺值,后同。为使风电机组的 优化出力接近于期望功率,应调整风电弃风运行惩 罚成本系数,当风电期望功率的值比较小时,应降 低风电弃风运行惩罚成本系数以减少风电机组的 优化出力:当风电期望功率的值比较大时,应提高 风电弃风运行惩罚成本系数以增加风电机组的优化 出力。另外,当风电期望功率的值比较大并且调整 风电弃风运行惩罚成本系数以使风电机组按期望功 率发电时,优化后的发电总成本有明显的降低,反之, 优化后的发电总成本大幅增加,这充分体现了风电机 组的环境价值。

#### 表 1 考虑风电弃风运行惩罚成本系数的动态潮流 仿真结果

Table 1 Simulative results of dynamic OPF with WAOPC

发电机	有功功率					
	时段1	时段2	时段3	时段4	时段 5	
$G_W$	0.4000	0.2761	0.1653	0.0005	0.1007	
$G_2$	0.4461	0.4458	0.4554	0.4884	0.4682	
G <sub>22</sub>	0.2720	0.3440	0.4127	0.4359	0.4218	
G <sub>27</sub>	0.2376	0.2372	0.2440	0.2675	0.2532	
G <sub>23</sub>	0.1932	0.1923	0.2046	0.2473	0.2213	
G13	0.3650	0.4171	0.4296	0.4725	0.4463	
$C_{\mathrm{WAOPC}}$	3.4500	3.4400	3.3500	3.0400	3.2300	
目标函数 值/( <b>\$・h</b> -1)	582.7905	614.8894	646.6472	685.5701	662.0114	

在其他成本系数保持不变、风电弃风运行惩罚 成本系数取为0的情况下,对所建动态优化模型进 行仿真求解,如表2所示。由表2可知,所有时段的 风电机组的优化出力低于期望功率,除了时段1,其 余时段的风电机组的优化出力为0,这是备用容量 补偿成本系数和风电运营成本系数共同作用的结 果,时段1的调度出力为0.2586p.u.,从而使该时段 优化后总成本最低。更重要的是,在忽略风电弃风运 行惩罚成本系数的情况下,在所有5个时段优化后 的总成本比考虑风电弃风运行惩罚成本系数时有明 显的增加,可以看出,风电弃风运行惩罚成本的引 入使风电获得了优先调度权,充分利用了风电机组 的环境价值。

#### 表 2 忽略风电弃风运行惩罚成本系数的 动态潮流仿真结果

Table 2 Simulative results of dynamic OPF without WAOPC

发电机	有功功率				
	时段1	时段2	时段3	时段4	时段5
$G_W$	0.2586	0	0	0	0
$G_2$	0.4900	0.5256	0.4932	0.4885	0.4885
G <sub>22</sub>	0.2720	0.3440	0.4160	0.4359	0.4359
G <sub>27</sub>	0.3040	0.2940	0.2709	0.2676	0.2676
G <sub>23</sub>	0.2220	0.2940	0.2536	0.2475	0.2475
G <sub>13</sub>	0.3650	0.4550	0.4786	0.4726	0.4726
目标函数 值∕(\$•h⁻¹)	630.8242	721.2625	715.6042	685.5419	705.5419

为了进一步验证所建模型的有效性,在将火电 机组名义环境补偿成本和风电弃风运行惩罚成本系 数设为 0、其他成本系数保持不变的情况下,对所建 模型进行静态仿真求解,所有时段的各台机组优化 结果相同,为 0、0.8、0.4、0、0.3、0.4196p.u.。对于不同 时段,风电机组的优化出力都为 0,低于期望功率, 这是备用容量补偿成本系数和风电运营成本系数共 同作用导致风电不参与优化调度,从而火电机组在 不同时段具有相同的仿真结果。更重要的是,5个时 段分别进行静态优化后的总成本比上述 2种动态仿 真情况下有明显的增加,为 730.3768 \$/h,这进一步 验证了所建模型的有效性,体现了风电的环境价值。

## 4 结论

由于风速具有随机变化的特点,本文首先计算 每个时段的风电场有功输出的期望值;在此基础上, 引入火电名义环境补偿成本和极限穿透功率的风电 场弃风运行惩罚成本来考虑环境效益;同时,引入风 电备用成本来处理随着系统风电穿透水平增加而引 起的系统备用上升,由此建立了大规模异步风电并 网的动态优化潮流新模型。对 IEEE 30 节点系统进 行修改测试,通过仿真得出以下结论。 **a.** 由于笼型异步风力发电机组具有特殊的电压-无功特性,易于建立动态优化潮流新模型。

b. 对环境污染大的机组调度权随名义环境补偿 成本系数的提高而降低,对环境更友好的机组随名 义环境补偿成本系数的提高获得优先调度权而处于 满发状态,由此可以看出,名义环境补偿成本不仅改 变了火电机组的调度权,而且赋予风电等环境友好的 可再生能源调度优先权,确保风电的优先发展。

c. 对不同的时段,为使风电机组的实际出力按 预测值进行调度,应调节风电弃风运行惩罚成本系 数,当风电期望功率的值比较大时,应提高风电弃风 运行惩罚成本系数以增加风电机组的优化出力,使 得优化后总成本减少;反之,降低风电弃风运行惩罚 成本系数以减少风电机组的优化出力,使得优化后 总成本增加。

该模型既考虑传统电力生产所带来的环境污染 和资源消耗等外部成本,同时也计及因弃风行为造 成的风电损失,可防止调度部门以穿透功率为借口 导致弃风行为的发生,使风电一直按期望值处于满 发状态,而其他能耗大的机组一直处于降额运行状态, 使以风电为代表的新能源环境价值得到合理的反映。

#### 参考文献:

- [1] 李生虎. 风力电力系统分析[M]. 北京:科学出版社,2012:1-5.
- [2] 周双喜,鲁宗相.风力发电与电力系统[M].北京:中国电力出版 社,2011:1-12,390-424.
- [3]周玮,彭昱,孙辉,等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J].中国电机工程学报,2009,29(25):13-18.
  ZHOU Wei,PENG Yu,SUN Hui,et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(25):13-18.
  [4] 江岳文,温步瀛. 结合风电功率超短期预测值偏差的实时市场调

[J] 出出文, 血少碱, 站台风电为牛超盈为快锅置偏差的头柄市汤两度[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3):12-17. JIANG Yuewen, WEN Buying. Real-time market dispatch based on ultra-short-term forecast error of wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3):12-17.

- [5] 王成福,梁军,张利,等. 基于机会约束规划的风电预测功率分级处理[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):14-19.
  WANG Chengfu,LIANG Jun,ZHANG Li,et al. Classified treatment of wind power predictive power based on chance constrained programming[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(17):14-19.
- [6] 孔波利,崔丽艳,丁钊,等. 基于风光混合模型的短期功率预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(18):62-66.
  KONG Boli,CUI Liyan,DING Zhao,et al. Short term power prediction based on hybrid wind-PV forecasting model[J]. Power System Protection and Control,2015,43(18):62-66.
- [7] 陈金富,陈海焱,段献忠. 含大型风电场的电力系统多时段动态 优化潮流[J]. 中国电机程学报,2006,26(3):31-35.
   CHEN Jinfu,CHEN Haiyan,DUAN Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J].

Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35.

[8] 刘学,李晖,周明,等.考虑风速相关性的多目标电网规划[J].电 力自动化设备,2015,35(10):87-94.

LIU Xue,LI Hui,ZHOU Ming,et al. Multiple-objective power grid planning considering wind speed correlation [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(10):87-94.

- [9] FRANCOIS B, GALIANA F D. Stochastic security for operations planning with significant wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 306-316.
- [10] 周双喜,王海超,陈寿孙.风力发电运行价值分析[J]. 电网技 术,2006,30(14):98-102.

ZHOU Shuangxi, WANG Haichao, CHEN Shousun. Analysis on operation value of wind power resources [J]. Power System Technology, 2006, 30(14):98-102.

- [11] HETZER J,YU D C,BHATTARAI K. An economic dispatch model incorporating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2):603-611.
- [12] 雷亚洲,王伟胜,印永华,等.风电对电力系统运行的价值分析
   [J].电网技术,2002,26(5):10-14.
   LEI Yazhou,WANG Weisheng,YIN Yonghua, et al. Analysis

of wind power value to power system operation [J]. Power System Technology, 2002, 26(5):10-14.

[13] 张海峰,高峰,吴江,等. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术,2013,37(5):1128-1303.

ZHANG Haifeng, GAO Feng, WU Jiang, et al. A dynamic economic dispatching model for power grid containing wind power generation system[J]. Power System Technology, 2013, 37 (5):1128-1303.

[14] 聂永辉,李天云,刘凤兰,等. 基于非线性内点理论的交直流系统无功优化新模型[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(10): 35-40.

NIE Yonghui,LI Tianyun,LIU Fenglan,et al. A new AC-DC reactive optimal power flow model based on nonlinear interior point method[J]. Power System Protection and Control,2014,42 (10):35-40.

 [15] 孙国强,任宾,卫志农,等. 基于自适应加权预测-校正内点法的 含 VSC-HVDC 电力系统最优潮流[J]. 电力自动化设备,2015,35 (3):54-59,67.

SUN Guoqiang, REN Bin, WEI Zhinong, et al. Optimal power flow of power system with VSC-HVDC based on AWPC-IPM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35 (3):54-59,67.

作者简介:



聂永辉(1970—),男,吉林吉林人,教授,博士,研究方向为电力系统优化运行及控制(**E-mail**:yonghui\_n@aliyun.com);

冯浩然(1991—),男,辽宁大连人,硕士研究生,研究方向为电力系统优化运行及控制(E-mail:1152332388@qq.com)。

聂永辉

# Dynamic optimal power-flow of power system with wind power

NIE Yonghui<sup>1</sup>, FENG Haoran<sup>2</sup>, YU Yongli<sup>3</sup>, WANG Zhongjie<sup>2</sup>

(1. Academic Administration Office, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. College of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

3. Jilin Petrochemical Branch Fine Chemicals Factory, PetroChina Co., Ltd., Jilin 132022, China)

**Abstract**: In order to reflect the wind-power environmental value, a dynamic optimal power-flow model is established for the power system integrated with large-scale asynchronous wind-power generation units under the electricity market environment. The power-output expectation of wind farm is calculated first, based on which, WAOPC (Wind Abandonment Operation Penalty Cost) is introduced based on the wind farm penetration limit to deal with the behaviour of wind-power curtailment. The pollution discharge characteristics of thermal power units are then considered, based on which, NECC (Nominal Environmental Compensation Cost) is introduced in the end to deal with the increase of system secondary reserve due to the raise of wind-power penetration level. The simulative results show that, the model considers not only the external costs of energy production, such as environmental pollution, resource consumption, etc., but also the loss of wind-power curtailment, reasonably reflecting the energy value of wind power.

Key words: electric power systems; wind power; wind-power environmental value; wind abandonment operation penalty cost; nominal environmental compensation cost; dynamic optimal power-flow