

# 计及需求响应策略的含风电场的机组组合优化模型

李 阳<sup>1</sup> 蒋正华<sup>2</sup> 徐 蔚<sup>1</sup> 周 杨<sup>1</sup>

(1. 广东电网发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510075;

2. 四川大学吴玉章学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 为了解决日益增长的风电机组并网容量对电网调度决策所带来的严峻挑战, 提出了一种基于需求响应策略的含风电机组的机组组合模型。首先建立风电机组出力概率模型、常规机组的运行费用模型和启动费用模型, 利用需求响应机制建立风电出力与用户负荷的关系, 提出了系统运行费用最小的目标函数。在考虑机组和系统的多种约束条件下, 提出了一种基于差分规则的和声搜索算法( DEHS) 来求取目标函数的最优解, 最后通过 IEEE 30 节点算例验证了模型的正确性和算法的有效性。

**关键词:** 风电功率; 需求响应; 差分规则; 和声算法

**Abstract:** In order to solve the severe challenge of power grid scheduling brought by the increasing grid - connected capacity of wind turbines , a kind of unit commitment model combined with wind turbines based on demand response strategy is put forward. Firstly , the output probability model of wind turbines , the operation cost model and startup cost model of the conventional unit are established. And then the correlativity between wind power output and consumers' load is established by demand response mechanism , and the objective function of minimum operation cost is proposed. A harmony search algorithm based on differential evolution ( DEHS) is presented to calculate the optimal solution of objective function considering the multiple constraints between the unit and the system. At last , the example of IEEE 30 bus system verifies the correctness of the model and the validity of the algorithm.

**Key words:** wind power; demand response; differential rules; harmony algorithm

中图分类号: TM715 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954( 2014) 03 - 0040 - 06

## 0 引 言

目前风电虽然被认为是一种无成本的绿色能源, 但是对于电力系统来说, 消纳和调度大规模的风电却会产生巨大的费用。这些费用主要是来源于风电的不可调度性、风电的波动性以及风电预测误差。比如, 日前风电出力误差就可能致次优的机组组合, 调度人员就可能组合了太多或太少的不可调度机组。这些预测误差也可能会导致高成本的辅助服务和常规机组频繁的开机以补偿风电出力的缺口。相似地, 风电的波动性可能会要求系统提供更多具有爬坡能力的常规机组。文献 [1] 运用了概率方法来估计了联合日前或实时风电出力误差的系统调度费用, 这些费用的比例可能占到风电收入的 10%。文献 [2 - 4] 研究了风电在日前机组组合、实时调度和辅助服务中的影响, 预计了系统对风电接受的费

用会达到 \$ 5/MWh。

一个能显著减少系统接受风电费用的方法就是通过实时电价来引入需求响应的方法。需求响应能够通过价格因素来利用风电出力引导用户需求, 能够减少风电预测误差和系统接受风电的费用。在需求响应机制下, 如果风电出力低于预测, 通过配置高费用的辅助服务来满足风电缺口, 会相应地减少电量需求和提供负荷的费用; 当风电出力高于预测时, 由于风电基本上可以当作是零成本的能源, 又可以引导用户增加用电量, 从而避免弃风。文献 [5] 论证了在满足发电机和系统约束的条件下, 需求响应是可以减少“弃风”现象的。需求响应除了能够减少系统接受风电的成本外, 还可以通过平衡用户对能源的支付需求和生产成本来提高系统的短期能源利用率。文献 [6] 指出如果通过需求响应来增加用户需求弹性, 可以减小加州在 2000 年至 2001 年间的能源危机的严重程度。

这里提出了一种基于需求响应策略的含有风电系统的机组组合模型。首先利用风速分布,得出了风电的概率分布模型,其次提出了火电机组的运行费用、启动费用和基于需求响应的用户需求改变量模型,然后在考虑机组和系统的多种约束条件下,提出了一种改进的和声搜索算法来求解所提出的模型,并用算例验证方法的正确性。

## 1 系统建模

### 1.1 风电出力模型

利用 Weibull 概率分布函数来描述风速变化规律<sup>[7]</sup>,即

$$f(v, c, k) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

其中  $v$  为风速;  $k$  为形状参数;  $c$  为尺度参数,反映了所描述地区的年平均风速大小。根据文献[8],风电机组的输出功率在给定的风速下,可如式(2)表示。

$$\begin{cases} w = 0 & v < v_i, v > v_0 \\ w = w_r \frac{v - v_i}{v_r - v_i} & v_i \leq v \leq v_r \\ w = w_r & v_r \leq v \leq v_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $w$  为风电机组的输出功率;  $w_r$  为其额定输出功率;  $v_i$  为切入风速;  $v_r$  为额定风速;  $v_0$  为切出风速。由于风速呈 Weibull 分布状态,因此利用公式(3)将该风速分布转化为相应的风电机组的功率分布。

$$\begin{cases} W = T(v) = av + b \\ f_w(w) = f_v[T^{-1}(w)] \left[ \frac{dT^{-1}(w)}{dw} \right] = f_v\left(\frac{w-b}{a}\right) \left| \frac{1}{a} \right| \end{cases} \quad (3)$$

其中  $v$  为风速随机变量;  $w$  为机组功率输出随机变量。得到风电输出功率分布如下。

$$P_r\{w=0\} = F_v(v_i) + (1 - F_v(v_0)) = 1 - e^{-\left(\frac{v_i}{c}\right)^k} + e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k} \quad (4)$$

$$f_w(w) = \frac{klv_i}{c} \left(\frac{1+\rho l}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{1+\rho l}{c}\right) \left(\frac{v_i}{c}\right)^k} \quad (5)$$

$$P_r\{w=w_r\} = F_v(v_0) + (1 - F_v(v_r)) = e^{-\left(\frac{v_0}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k} \quad (6)$$

式(5)中  $\rho$  为风电机组输出占其额定功率的百分比;  $l$  为风速占切入风速的线性比例。

### 1.2 火电厂运行费用

$$C_{it}(p(i, t), u(i, t)) =$$

$$(\alpha_i p(i, t)^2 + \beta_i p(i, t) + \gamma_i) u(i, t) \quad (7)$$

式中  $C_{it}$  是机组  $i$  在  $t$  时刻运行时的运行费用;  $p(i, t)$  为该机组在  $t$  时刻的出力;  $u(i, t)$  为机组的运行状态, 1 为开启, 0 为停机;  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  为机组  $i$  的运行费用系数。

### 1.3 火电厂的启动费用

火电厂的启动费用取决于机组的停机时间,当停机机组的温度相对于其运行时的温度时,机组的启动费用可能从最大的冷启动费用变化到一个非常小的值。

$$S_{it}(u(i, t)) := \max_{\tau=0: \tau_i^c} C_{it}(u(i, t) - \sum_{k=1}^{\tau} u(i, t-k)) \quad (8)$$

式中  $\rho = C_{i0} < \dots < C_{i\tau_i^c}$  为固定的启动费用系数;  $\tau_i^c$  为机组  $i$  的冷却时间;  $C_{i\tau_i^c}$  为最大的冷启动费用。

### 1.4 需求响应的负荷改变量模型

根据需求侧竞价原理,通过负荷的改变为系统提供一种用户主动改变的可控负荷资源,利用价格因素来引导用户在风电机组出力高峰时期多用电,而在风电机组出力低谷时期,利用用户的可控负荷为系统提供备用资源,从而更好地接受风电,减少系统所必需提供的备用,减少系统运行成本。

根据文献[9],利用下列公式定义电量电价弹性为

$$\varepsilon = \frac{\Delta D_l / D}{\Delta l / l} \quad (9)$$

其中  $\Delta l$  为电价  $l$  的改变量;  $\Delta D_l$  为负荷  $D$  由于  $\Delta l$  引起的改变量。

由于负荷改变量不仅和该时段的电价有关,还与其他时段的电价有关,利用自弹性  $\varepsilon_{ii}$  和互弹性  $\varepsilon_{ij}$  的概念来描述。

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\Delta D_{li} / D_i}{\Delta l_i / l_i} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta D_{li} / D_i}{\Delta l_j / l_j} \quad (11)$$

式中  $l_i, l_j, \Delta l_i, \Delta l_j$  分别表示第  $i, j$  时段的电价和电价改变量;  $D_i, \Delta D_{li}$  为第  $i$  时段的原始负荷和负荷改变量。

根据式(4)和式(5)能够得出第  $i$  时段的负荷改变量  $\Delta D_{li}$  为

$$\Delta D_{li} = D_{li} \cdot \left( \frac{\Delta l_i}{l_i} \cdot \varepsilon_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{T_D} \frac{\Delta l_j}{l_j} \cdot \varepsilon_{ij} \right) \quad (12)$$

其中  $T_D$  为全时段。

定义  $\varepsilon_{ii}$  为负值,  $\varepsilon_{ij}$  为正, 可以得出全时段由需求弹性而接受风电的总收益  $M'_{ij}$  为

$$M'_{ij} = \sum_{i=1}^{T_D} \left[ D_{li} (l_i + \Delta l_i) \left( 1 + \frac{\Delta l_i}{l_i} \cdot \varepsilon_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^{T_D} \frac{\Delta l_j}{l_j} \cdot \varepsilon_{ij} \right) \right] \quad (13)$$

同样的, 如果风电机组出力低于预测出力, 那么, 可以利用价格机制来引导用户的可控负荷来提供上行和下行备用, 而不用频繁的开启常规机组。那么该时段用户的可控负荷所提供的上行或下行备用折算为成本  $M'_d$  为

$$M'_d = \sum_{i=1}^{T_D} \delta \cdot l \Delta D_{du, i} + \sum_{j=1, j \neq i}^{T_D} (1 - \tau) \cdot l_j \Delta D_{dd, j} \quad (14)$$

其中  $\Delta D_{du, i}$  为  $i$  时段的上行备用调度量;  $\delta$  为该时段的上行备用补偿率;  $\Delta D_{dd, j}$  为  $j$  时段的下行备用调度量;  $\tau$  为该时段的下行备用折扣率。

综上, 在研究时段内, 以系统运行费用最小为目标函数为

$$\min \sum_t \sum_i (C_{ii} + S_{ii} + M'_d - M'_{ij}) \quad (15)$$

### 1.5 约束条件

#### ① 机组出力和备用约束(系统约束)

$$p^{\min}(t) \leq \sum_i p(i, t) u(i, t) \leq p^{\max}(t) \quad (16)$$

$$R^{\min}(t) \leq \sum_i R(i, t) u(i, t) \leq R^{\max}(t) \quad (17)$$

$$N^{\min}(t) \leq \sum_i N(i, t) \leq N^{\max}(t) \quad (18)$$

其中  $p^{\min}(t)$ 、 $p^{\max}(t)$  分别为  $t$  时刻时总机组的最小发电量和最大发电量;  $R^{\min}(t)$ 、 $R^{\max}(t)$  分别为  $t$  时刻时总的旋转备用的最小值和最大值;  $N^{\min}(t)$ 、 $N^{\max}(t)$  分别为总的非旋转备用的最小值和最大值。

#### ② 机组出力约束(机组约束)

$$p_{g\min}(i) \leq p(i, t) u(i, t) + R(i, t) u(i, t) + N(i, t) p(i, t) u(i, t) + R(i, t) u(i, t) + N(i, t) \leq p_{g\max}(i) \quad (19)$$

$$R(i, t) u(i, t) \leq r_s(i, t) u(i, t) \quad (20)$$

$$r_s(i, t) = \min\{10 \times MSR(i), p_{g\max}(i, t) - p(i, t)\} \quad (21)$$

式中  $p_{g\min}(i)$ 、 $p_{g\max}(i)$  分别为机组  $i$  的最小和最大发电量;  $MSR(i)$  为机组  $i$  的爬坡率。

#### ③ 机组的爬坡率约束

$$p(i, t) - p(i, t-1) \leq ur(i) \quad (22)$$

$$p(i, t-1) - p(i, t) \leq dr(i) \quad (23)$$

其中  $ur(i)$ 、 $dr(i)$  为机组  $i$  的上、下行爬坡速率, MW/h。

#### ④ 机组的开停机时间约束

$$[X^{on}(i, t) - T^{on}(i, t)] \times [u(i, t-1) - u(i, t)] \geq 0 \quad (24)$$

$$[X^{off}(i, t-1) - T^{off}(i, t)] \times [u(i, t-1) - u(i, t)] \geq 0 \quad (25)$$

其中  $X^{on}$ 、 $X^{off}$  为机组  $i$  的开停机持续时间。

## 2 混合和声算法

和声搜索算法(harmony search, HS)最早由 Geem 受音乐家不断调整声调获得和声机制启发而提出的。音乐家进行音乐创作主要有3种方式:从记忆中寻找、对部分音调局部调整、随机灵感激发。对应地,和声搜索算法主要通过3种操作产生新解,即记忆选择、局部调谐、随机生成。

HS算法的参数主要包括记忆库  $N$ , 记忆选择概率  $HMCR$ , 局部调整概率  $PAR$ 、调整步长  $bw$  等。

HS算法主要通过下式生成初始记忆库。

$$HM = \{x_1, x_2, \dots, x_N\};$$

$$x_{ij} = l_i + rand() \cdot (u_j - l_j)$$

$$j = 1, 2, \dots, d; i = 1, 2, \dots, N \quad (26)$$

其中  $x_{ij}$  为第  $i$  个和声的第  $j$  维组分;  $u_j$  和  $l_j$  为第  $j$  维组分的搜索上下界;  $d$  为问题维度;  $rand()$  表示  $0 \sim 1$  之间的均匀分布的随机数。

在和声搜索的每一代,算法通过记忆选择、局部调谐和随机生成3个操作完成“创新”,即生成新的和声  $v = \{v_1, v_2, \dots, v_d\}$ 。在创作  $v$  的过程中,每一维组分都按  $HMCR$ (记忆选择概率)从记忆库中随机选择现有记忆,否则随机生成,即

$$v_j = \begin{cases} x_{rnd, j}, & rnd() < HMCR \\ l_j + rand() \cdot (u_j - l_j), & else \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (27)$$

式中  $rnd()$  为  $1 \sim N$  之间的随机整数。

进而,对于由记忆选择产生的组分以  $PAR$ (局部调整概率,或称调谐概率)按照如下方式进行局部调整产生新的和声。

$$v_j = \begin{cases} v_j \pm rand() \cdot bw, & rnd() < PAR \\ v_j, & else \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, d \quad (28)$$

表 1 火电机组参数

机组	有功下限 /p. u.	有功上限 /p. u.	$\alpha_i / (\$ \cdot (\text{MW})^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$	$\beta_i / (\$ \cdot (\text{MW})^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$	$\gamma_i / (\$ \cdot \text{h}^{-1})$	$R^{\min} / (\text{p. u.} \cdot \text{h}^{-1})$	$R^{\max} / (\text{p. u.} \cdot \text{h}^{-1})$
1	0.50	2.0	0.152 4	38.539 7	786.798 8	-0.50	0.50
2	0.25	1.0	0.105 8	46.159 1	945.633 2	-0.30	0.30
5	0.15	0.6	0.028 0	40.396 5	1 049.997 7	-0.15	0.15
8	0.20	0.8	0.035 4	38.305 5	1 243.531 1	-0.20	0.20
11	0.10	0.4	0.021 1	36.327 8	1 658.569 6	-0.15	0.15
13	0.10	0.4	0.017 9	38.270 4	1 356.659 2	-0.15	0.15

表 2 日负荷需求参数

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$p_{dt} / \text{p. u.}$	1.899	1.785	1.700	1.672	1.672	1.700	2.097	2.437	2.692	2.721	2.721	2.692
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$p_{dt} / \text{p. u.}$	2.692	2.692	2.636	2.664	2.801	2.834	2.834	2.721	2.578	2.352	2.069	1.785

表 3 24 个时段电价改变量的计算结果

时段	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\beta_i$	32.56	110.47	88.61	101.29	-120.93	-180.4	53.5	14.88	93.71	-123.92	-11.20	-134.84
时段	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\beta_i$	-45.55	100.38	79.12	88.36	69.85	4.80	-47.18	45.50	68.28	-50.05	-62.15	-25.17

当新的和声产生之后,算法将其与记忆库中最差的和声进行比较,并采用贪婪机制进行解的替换。标准和声搜索的算法流程如图 1。

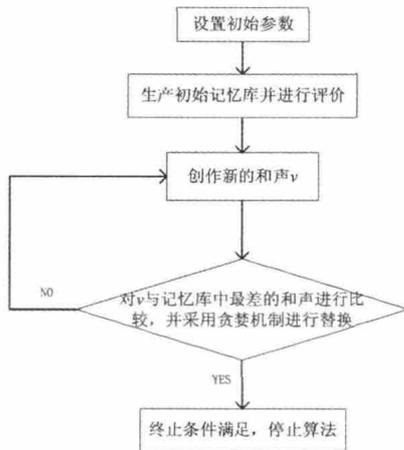


图 1 算法流程图

仅仅通过随机产生元素的方法,和声搜索往往难以产生有效元素,得不到有效的和声。而差分算法基于两个个体的差分项产生新个体,能够有效产生新组分。将标准和声搜索算法中第三步利用差分思想进行改进,提出了一种基于差分规则的混合和声算法(DE-HS),其中  $x_k^{best}$  为记忆库中最优的第  $k$  维组分,  $k$  为  $1 \sim d$  上均匀分布的随机整数,  $cr$  为  $0 \sim 1$  之

间的交叉因子,  $F$  为 DE 的比例因子,  $r_1, r_2$  和  $r_3$  为  $1 \sim N$  之间互不相等的整数。具体操作如下。

$$v_j = \begin{cases} x_{rnd_j} \cdot rand() < HMCR \\ x_k^{best} \cdot rand() < PRA \end{cases} \quad (29)$$

$$v_j = \begin{cases} x_{r_1_j} + F \cdot (x_{r_2_j} - x_{r_3_j}) & rand() < cr \\ l_j + rand() \cdot (u_j - l_j) & \text{else} \end{cases} \quad (30)$$

### 3 算例分析

在 Matlab 条件下利用 IEEE 30 节点(图 2)验证上述模型和算法。其中,仅仅考虑需求响应下系统所能接受的最大风电容量,并假设各时段参加需求响应而引起的负荷改变量为 18%。根据文献[10]取自弹性和互弹性系数为  $-0.3, 0.17$ ,初始电价为  $60 \$ / \text{MWh}$ ,折扣电价为实时电价的 60%,补偿电价为初始电价的 2 倍。在风电机组模型中,风机额定出力为  $0.3 \text{ p. u.}$ ,切入风速  $v_i = 3 \text{ m/s}$ ,额定风速  $v_r = 18 \text{ m/s}$ ,切出风速  $v_o = 25 \text{ m/s}$ ,假设风机安装地点地形平坦,则取形状参数  $k = 2.2$ ,尺度参数  $c = 8.9$ ,图 2 中的 20 节点为风电场并网节点,功率的基准值为  $100 /$

MWh。混合和声搜索算法的参数设置如下: 种群数量设为 100  $F=0.7$   $cr=0.8$   $HMCR=0.8$   $PAR=0.3$ 。

表 1 和表 2 分别为火电机组的参数、日负荷需求参数。

根据以上条件, 计算出的 24 个时段的电价改变量, 如表 3。

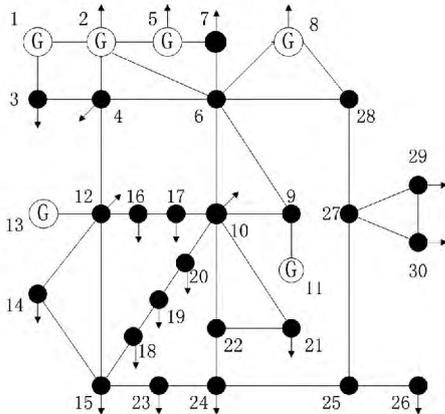


图 2 IEEE 30 节点

计算出的备用调用量和负荷改变量如图 3。由于风电具有比较明显的反调峰特性, 引入需求响应后, 可以看出, 其对风电出力的波动具有一定的抑制作用, 且对系统来说, 能起到一定的削峰填谷的作用。需求响应能减少常规机组由于风电波动而引起的频繁开停机, 能进一步减少系统的运行费用, 能收到一定的经济效益。

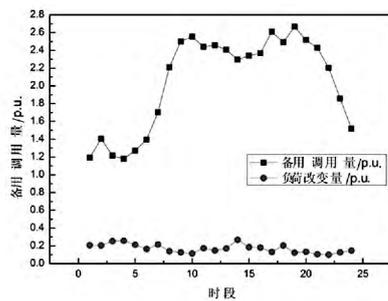


图 3 备用调用量和负荷改变量计算结果

为了说明所提出的基于差分规则的和声搜索算法求解该目标函数的有效性和优越性, 将该算法与标准和声搜索算法、差分算法进行比较, 比较结果见表 4。

表 4 算法的性能比较

算法	最优解 /\$	平均解 /\$	最差解 /\$	计算时间/s	迭代次数
HS	369 321	377 730	386 139	34.50	35
DE	407 430	433 758	460 086	40.16	52
DE-HS	325 066	325 074	325 082	20.85	16

## 4 结 论

随着风电机组并网容量的不断增长, 电网面临着越来越严峻的挑战。传统电网吸收风电的主要措施是规定风电场出力保持在一定功率, 这样一方面就会使一部分常规机组长期处于空载状态, 增加了系统的运行费用; 另一方面, 如果风电机组出力增多的情况下, 就会出现“弃风”现象, 降低了风电的经济性。引入需求响应策略后, 利用价格机制来调整用户的负荷需求, 当风电出力低于预期时, 利用用户的可控负荷为系统提供备用。需求响应不仅抑制了风电的波动, 改善了系统的可靠性, 而且还降低了电量价格。所提出的混合和声搜索算法能有效快速地解决所提出的模型, 且计算结果相比标准和声搜索算法和差分算法更优, 为解决此类问题提供了一种实用方法。当然, 由于条件有限, 没有考虑常规机组运行中的阀点效应和禁止运行区域, 以及风电场的位置和容量对系统的影响, 这些都值得进一步的进行探讨。

### 参考文献

- [1] Fabbri A, Roman T G S, Abbad J R, et al. Assessment of the Cost Associated with Wind Generation Prediction Errors in a Liberalized Electricity Market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1440 - 1446.
- [2] DeMeo E A, Grant W, Milligan M R, et al. Wind Plant Integration [Wind Power Plants] [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2005, 3(6): 38 - 46.
- [3] Smith J C, Milligan M R, DeMeo E A, et al. Utility Wind Integration and Operating Impact State of the Art [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 900 - 908.
- [4] DeMeo E A, Jordan G A, Kalich C, et al. Accommodating Wind's Natural Behavior [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(6): 59 - 67.
- [5] Sioshansi R, Short W. Evaluating the Impacts of Real-time Pricing on the Usage of Wind Generation [J]. IEEE Power Systems, Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 516 - 524.
- [6] Borenstein S. The Trouble With Electricity Markets: Understanding California's Restructuring Disaster [J]. The Journal of Economic Perspectives, 2002, 16(1): 191 - 211.

[7] Seguro J V , Lambert T W. Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 2000 , 85( 1) : 75 - 84.

[8] 苏勋文 , 米增强. 基于运行数据的风电机组建模方法 [J]. 电力系统保护与控制 2010 , 38( 9) : 49 - 55.

[9] Faruqui A , George S. Quantifying Customer Response to Dynamic Pricing [J]. The Electricity Journal , 2005 , 18 ( 4) : 53 - 63.

[10] King C , Chatterjee S. Predicting California Demand Response [J]. Public Utilities Fortnightly , 2003 , 141

( 13) : 27 - 32.

作者简介:

李 阳(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划与分析、新能源技术方面的研究;

蒋正华(1993), 本科, 主要从事电力系统规划与分析、电力系统风险评估等方面的研究;

徐 蔚(1984), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划与分析、新能源技术方面的研究;

周 杨(1987), 硕士研究生, 主要从事电力系统规划分析、新能源技术方面的研究。

( 收稿日期: 2014 - 05 - 04)

( 上接第 30 页)

针对舟山多端柔性直流输电工程进行了分析, 绘制了舟山工程的拓扑机构, 并提出相应的控制策略。通过仿真验证舟山系统采用电压偏差控制、无源孤岛控制以及无功功率和交流电压斜率偏差控制时, 能够提高舟山系统在交流故障、换流站退出、孤岛运行以及远方电压降落时稳定运行的能力, 增强了舟山系统运行的可靠性和灵活性。

参考文献

[1] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

[2] 张欢, 刘天琪, 李兴源, 等. 新型多端直流输电技术研究 [J]. 四川电力技术, 2007, 30( 6) : 1 - 5.

[3] 陈谦, 唐国庆, 胡铭. 采用 dq0 坐标的 VSC - HVDC 稳态模型与控制器设计 [J]. 电力系统自动化, 2004 , 28( 16) : 61 - 66.

[4] 饶宏, 黄莹, 陈名, 等. 中海油文昌柔性直流输电系统启停仿真分析 [J]. 南方电网技术, 2011 , 5( 4) : 5 - 9.

[5] Nikolas Flourentzou , Vassilios G. Agelidis. Georgios D. Demetriades. VSC - Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview. IEEE Transactions on Power Electronics , 2009 , 24( 3) : 592 - 602.

[6] 赵成勇, 李广凯, 孙营. 双馈入直流输电系统中 VSC - HVDC 的控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008 , 28( 7) : 97 - 103.

[7] 李兴源, 陈凌云, 颜泉, 等. 多馈入高压直流输电系统非线性附加控制器的设计 [J]. 中国电机工程学报, 2005 , 25( 15) : 16 - 19.

[8] 李兴源, 邵震霞, 汤广福. 多馈入高正直流输电系统的分散协调控制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005 , 25 ( 16) : 8 - 12.

[9] Gunnar Asplund , Kjell Eriksson , Birger Drugg. Electric

Power Transmission to Distant Loads by HVDC Light [C]. Distribution 2000 Sydney , Australia , 2000; 1 - 7

[10] Anna - Karin Skytt , Per Holmberg , Lars - Erik Juhlin. HVDC Light for Connection of Wind Farm [C]. Second International Workshop on Transmission Network for Off-shore Wind Farm , Royal Institute of Technology Stockholm , Sweden , 2001: 1 - 6.

[11] 郭小江, 马世英, 申洪, 等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012 , 36( 15) : 107 - 115.

[12] 王国强, 王志新, 张华强, 等. 基于 DPC 的海上风场 VSC - HVDC 变流器控制策略 [J]. 电力自动化设备, 2011 , 31( 7) : 115 - 119.

[13] 陈霞, 林卫星, 孙海顺, 等. 基于多端直流输电的风电并网技术 [J]. 电工技术学报, 2011 , 26( 7) : 60 - 67.

[14] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展 [J]. 电网技术, 2008 , 32 ( 22) : 39 - 44.

[15] Prabha Kundur. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.

[16] VSC - HVDC 的风电场联网技术研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2007.

[17] 吴浩, 徐重力, 张杰峰, 等. 舟山多端柔性直流输电技术及应用 [J]. 智能电网. 2013 , 1( 2) : 22 - 26

作者简介:

胡 欣(1987), 硕士研究生, 主要研究方向为高压直流输电系统;

李兴源(1945), 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为电力系统稳定与控制;

朱瑞可(1988), 博士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定与控制。

( 收稿日期: 2014 - 04 - 23)