

# 兼顾小信号稳定性与经济性的混合风电场机型占比优化策略

王浩成<sup>1</sup>,涂银钢<sup>1</sup>,仇子铭<sup>1</sup>,邹小明<sup>2</sup>,杜 雄<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输变电装备技术全国重点实验室,重庆 400044;  
2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院,江苏 南京 211103)

**摘要:**当前混合风电场的机型占比优化配置大多以经济效益为主要目标,忽略了系统小信号稳定性的约束。为此,提出一种兼顾小信号稳定性与经济性的混合风电场机型占比优化策略。构建混合风电场并网系统的全风速区间小信号模型,提出风速-机型占比稳定运行域的分析方法;建立含机型占比的混合风电场全生命周期经济性模型,并以稳定运行域为约束,构建以净现值最高和度电成本最低为目标的多目标优化模型;采用快速非支配排序遗传算法获得兼顾稳定性与经济性的机型占比前沿解集,并使用优劣解距离法给出最优机型占比方案。通过对4类典型风资源区的算例分析,验证了所提策略的有效性。研究结果表明,小信号稳定约束对混合风电场最优机型占比方案影响显著,在风电场经济性规划阶段需要予以考虑。

**关键词:**混合风电场;风力发电;风电场机型占比;小信号稳定性;稳定性分析;稳定运行域;经济性

**中图分类号:**TM614

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202604025

## 0 引言

在全球能源结构向可再生能源转型的背景下<sup>[1]</sup>,风力发电因技术成熟度高、开发潜力巨大,深受各国青睐。目前风力发电主流机型为直驱风机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)和双馈风机(double-fed induction generator, DFIG)。其中,DFIG在经济性上更具优势,PMSG则在运行可靠性与电网友好性方面表现更优。在大规模风电场建设时,可根据风电场的装机容量、建设成本及具体地理环境等因素,灵活选择适合投建的风电机组类型,从而形成由PMSG和DFIG组成的混合风电场<sup>[2]</sup>,如河北沽源风电场。然而,2种风机的机型占比与混合风电场稳定性和经济性密切相关<sup>[3]</sup>,不合理的机型占比可能会造成高成本、低收益的经济性问题,或者在某些工况下诱发风电场振荡失稳。因此,在风电场规划建设初期确定兼顾小信号稳定性与经济性的机型占比具有重要实际意义。

风电场项目通常拥有较长的运营周期,涉及建设、运营、维护以及最终退役等多个阶段。现有关于经济效益的研究大多从风电场全生命周期的角度开展<sup>[4]</sup>。文献[5-6]探讨如何从全生命周期角度降低风电成本。文献[7]分析风电项目的投资经济效益,提出保障效益的相关建议。文献[8]明确各类型成

本的占比,并给出降低成本的相关建议。现有研究主要集中在风电场项目全生命周期的成本和效益分析,鲜有涉及混合风电场的经济性机型占比优化配置。

实际运行工程经验表明,混合风电场也会发生小干扰稳定性事故,并且由于PMSG和DFIG这2种机型的交互作用,其振荡影响因素及系统振荡特性更为复杂。对于直驱风电场与双馈风电场在不同风速下的小信号稳定性,现有研究表明,直驱风电场系统的阻尼随风速的增大而减小,双馈风电场系统的阻尼随风速的减小而减小<sup>[9-10]</sup>。对于混合风电场:文献[11-12]研究不同风速下的系统小信号稳定性;文献[13]研究影响混合风电场次同步振荡的因素,明确了串补度、机型占比是影响次同步振荡的重要因素。然而,现有研究的分析重点在于风速、串补度及机型占比对系统稳定性的影响,未给出在不同风速-机型占比情况下的系统稳定运行区间,并且没有评估机型占比对混合风电场规划建设经济性影响。

针对上述问题,本文提出兼顾小信号稳定性与经济性的混合风电场机型占比优化策略,能够在保障系统稳定性的前提下获得经济性最优的机型占比。首先,建立含机型占比变量的混合风电场风速-频率二元导纳模型;其次,提出风速-机型占比稳定运行域分析方法,刻画系统稳定与失稳的边界工况,为后续经济性分析提供约束条件;然后,基于全生命周期理论,建立含机型占比的混合风电场成本与收益模型,以稳定运行的机型占比范围为约束条件;最后,采用快速非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)与优劣解距离法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)进行多目标优化求解,

收稿日期:2026-03-03;修回日期:2026-04-21

在线出版日期:2026-04-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52207188);国家自然科学基金国家杰出青年科学基金资助项目(52125704)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52207188) and the Program of National Natural Science Foundation of China for Distinguished Young Scholars (52125704)

确定兼顾小信号稳定性与经济性的混合风电场最优机型占比方案。

## 1 混合风电场并网系统建模及稳定运行域

### 1.1 混合风电场并网系统导纳模型

由PMSG和DFIG组成的混合风电场经串补并网系统如附录A图A1所示。直驱风电场与双馈风电场经箱式变压器 $T_1$ 升压至35 kV后汇集至并网母线,然后通过升压变压器 $T_2$ 和 $T_1$ 将电能输送至500 kV电网。其中,220 kV和500 kV线路电阻、电抗分别为 $R_{L2}$ 、 $X_{L2}$ 和 $R_{L1}$ 、 $X_{L1}$ ,变压器 $T_1$ 和 $T_2$ 的漏抗分别为 $X_{T1}$ 和 $X_{T2}$ 。为提升风电场并网容量和风能利用率,在500 kV线路投入串联补偿装置,其等效容抗为 $X_C$ 。

输电系统等效阻抗 $Z_g$ 可表示为:

$$Z_g = R_{L1} + R_{L2} + j(X_{L1} + X_{L2} + X_{T1} + X_{T2}) - jX_C \quad (1)$$

在构建系统模型时:首先构建全风速工作区间下PMSG与DFIG的风速-频率二元导纳模型;然后,以集电子网络为单位,考虑尾流效应,对集电子网络内 $n$ 台机组进行导纳聚合;最后,将所有集电子网络的导纳相加,得到混合风电场的二元导纳模型。由于文章篇幅有限,详细建模过程可参考文献[14-16],混合风电场的风速-频率二元导纳模型如附录B式(B1)所示。

假设PMSG与DFIG的数量分别为 $nm_1$ 、 $nm_2$ 。其中, $m_1$ 为PMSG类型集电子网络数量, $m_2$ 为DFIG类型集电子网络数量,则 $m = m_1 + m_2$ 为集电子网络总数。定义PMSG机型占比 $\alpha = m_1/m$  ( $\alpha \in (0, 1)$ ),则计及机型占比的混合风电场二元导纳模型可表示为:

$$\begin{cases} Y_{\text{saw}}(\omega_p, v_w, \alpha) = nm\alpha Y_{\text{saw}_P}(\omega_p, v_w) + nm(1-\alpha)Y_{\text{saw}_D}(\omega_p, v_w) \\ Y_{\text{aaw}}(\omega_p, v_w, \alpha) = nm\alpha Y_{\text{aaw}_P}(\omega_p, v_w) + nm(1-\alpha)Y_{\text{aaw}_D}(\omega_p, v_w) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Y_{\text{saw}}(\omega_p, v_w, \alpha)$ 、 $Y_{\text{aaw}}(\omega_p, v_w, \alpha)$ 分别为计及机型占比的混合风电场自导纳和伴随导纳, $\omega_p$ 为扰动频率, $v_w$ 为风速, $\alpha$ 为PMSG机型占比; $Y_{\text{saw}_P}(\omega_p, v_w)$ 、 $Y_{\text{aaw}_P}(\omega_p, v_w)$ 分别为直驱风电场自导纳和伴随导纳; $Y_{\text{saw}_D}(\omega_p, v_w)$ 、 $Y_{\text{aaw}_D}(\omega_p, v_w)$ 分别为双馈风电场自导纳和伴随导纳。

### 1.2 混合风电场并网系统小信号稳定运行域

现有研究通常使用三维波特图观察风速对系统阻抗特性的影响<sup>[15]</sup>,但本文增加机型占比 $\alpha$ 这一变量,导致难以通过传统三维波特图法同时衡量风速及机型占比对系统稳定性的影响。为确定系统在全风速区间内稳定运行的机型占比范围,本文提出混合风电场风速-机型占比稳定运行域分析方法。

为便于进行稳定性分析,将多输入多输出的混合风电场导纳模型转化为单输入单输出模型<sup>[17]</sup>,混合风电场等效导纳 $Y_{\text{HWF}}(\omega_p)$ 如附录B式(B2)所示。

此时,计及风速与机型占比的系统稳定性判据为:

$$\begin{cases} \text{Mag}[Z_{\text{HWF}}(w_x)] - \text{Mag}[Z_g(f_x)] = 0 \\ |\text{Pha}[Z_{\text{HWF}}(w_x)] - \text{Pha}[Z_g(f_x)]| < 180^\circ - \sigma \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\text{Mag}[\cdot]$ 表示阻抗变量的幅值; $\text{Pha}[\cdot]$ 表示阻抗变量的相位; $f_x$ 为混合风电场等效阻抗和输电系统等效阻抗幅值相等的频率; $w_x$ 为混合风电场等效阻抗和输电系统等效阻抗幅值相等的角频率, $w_x = 2\pi f_x$ ;  $Z_{\text{HWF}}(w_x)$ 为角频率 $w_x$ 下的混合风电场等效阻抗, $Z_{\text{HWF}}(\omega_p) = 1/Y_{\text{HWF}}(\omega_p)$ ,此时 $\omega_p = \omega_x$ ;  $\sigma$ 为预留的相位裕度 $10^\circ$ <sup>[18]</sup>。

根据阻抗分析法,在混合风电场等效阻抗和输电系统等效阻抗幅值相等的频率点 $f_x$ 处:若两者相位差小于 $170^\circ$ ,则系统稳定性强;若两者相位差在 $170^\circ \sim 180^\circ$ 内,则系统稳定性差;若两者相位差大于 $180^\circ$ ,则系统不稳定。基于此稳定判据,本文混合风电场并网系统风速-机型占比稳定运行域分析方法步骤如下。

1)在风电机组的全运行风速区间 $[v_{\min}, v_{\max}]$ 及机型占比区间 $[0, 1]$ 内,对风速 $v_w$ 和机型占比 $\alpha$ 进行离散化遍历,其中: $v_{\min}$ 为风电机组切入风速; $v_{\max}$ 为风电机组切出风速。

2)将每一个离散工作点 $(\alpha, v_w)$ 均代入式(2)进行稳定性判定:若某一工作点满足稳定判据,则将其定义为强稳定工作点 $(\alpha_s, v_{ws})$ ;若某一工作点对应的相位裕度满足 $0^\circ < \sigma \leq 10^\circ$ ,则将其定义为弱稳定工作点 $(\alpha_w, v_{ww})$ 。

3)在 $v_w$ - $\alpha$ 二维平面内汇总所有强稳定工作点 $(\alpha_s, v_{ws})$ 与弱稳定工作点 $(\alpha_w, v_{ww})$ ,可分别得到系统的强稳定运行域与弱稳定运行域。

$v_w$ - $\alpha$ 平面稳定运行域如图1所示。

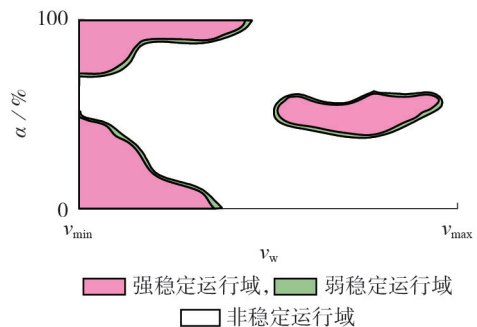


图1  $v_w$ - $\alpha$ 平面稳定运行域

Fig.1 Stable operation domain in  $v_w$ - $\alpha$  plane

在实际风电并网系统中,有时会在输电线路上加装串联补偿装置以提升系统输送容量,串补度因输电线路、电网结构及系统需求而异。然而,不同的串补度可能会影响风电场的并网稳定性,例如,文献[19]指出串补度与双馈风电场并网系统的次同步稳定性呈负相关。

图2为无串补度以及串补度分别为30%、40%、60%时的混合风电场稳定运行域。图2(a)对应的全风速稳定运行的机占比区间为 $[0, 87\%]$ ,其中,强稳定运行区间为 $[0, 85\%]$ ;图2(b)对应的全风速稳定运行的机占比区间为 $[69\%, 91\%]$ ,其中,强稳定运行区间为 $[75\%, 88\%]$ ;图2(c)对应的全风速稳定

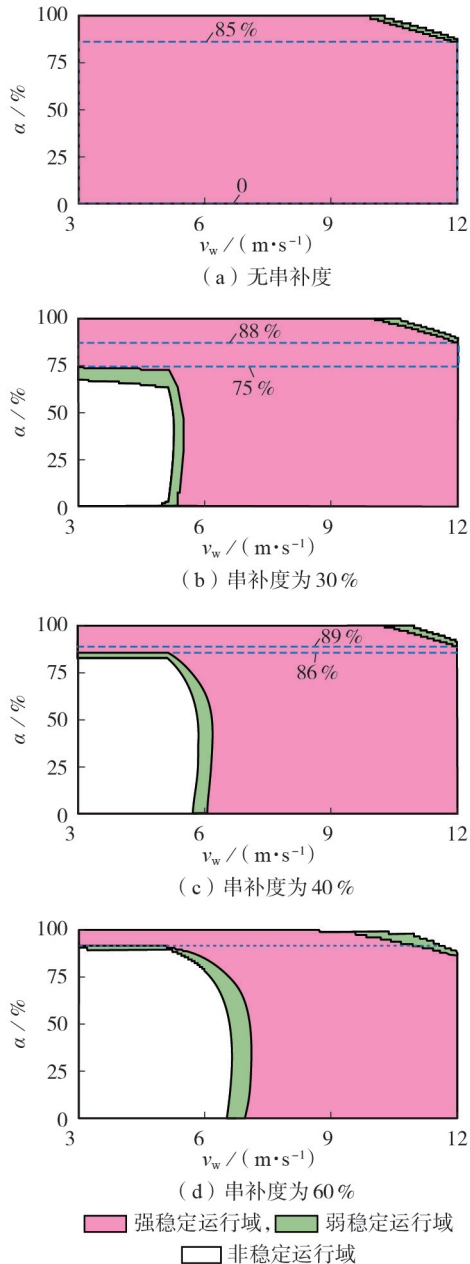


图2 不同串补度下的稳定运行域

Fig.2 Stable operation domains under different serial compensation degrees

定运行的机占比区间为 $[82\%, 92\%]$ ,其中,强稳定运行区间为 $[86\%, 89\%]$ ;图2(d)中不存在能使混合风电场并网系统在全风速区间内稳定运行的机占比。

综上,串补度对混合风电场并网系统风速-机占比稳定性存在较大影响,决定了后文经济性机占比优化的稳定约束范围。

## 2 考虑机占比的混合风电场经济性分析模型

### 2.1 风电项目经济评价指标

本文选择风电项目常用的净现值和度电成本作为经济性指标<sup>[20]</sup>来对项目进行评价。

净现值 $V_{NP}$ 的表达式为:

$$V_{NP} = C_{LLR} - C_{LCC} \quad (4)$$

式中: $C_{LLR}$ 为项目折算后的总收益; $C_{LCC}$ 为该项目经折算后的总支出。

度电成本 $C_{LCOE}$ 的表达式为:

$$C_{LCOE} = C_{LCC} / \sum_{t=0}^T E(t) \quad (5)$$

式中: $E(t)$ 为第 $t$ 年的风电场全年发电量; $T$ 为项目的全生命周期年限。

混合风电场中的PMSG和DFIG在成本收益、额定功率输出等方面存在明显差异,两者的机占比会对混合风电场全生命周期的经济性产生影响,因此,本文将构建含机占比的混合风电场全生命周期成本和收益模型。

### 2.2 含机占比的混合风电场成本模型

混合风电场成本模型的结构主要包括初始建设投资成本 $C_{IC}(\alpha)$ 、运维成本 $C_{OC}(\alpha)$ 和退役报废成本 $C_{DC}(\alpha)$ <sup>[21]</sup>三部分,如附录A图A2所示。

1) 初始建设投资成本 $C_{IC}(\alpha)$ 。

初始建设投资成本主要包括建筑工程费、风电机组购置费、安装工程费、建设投资利息。

建筑工程费 $C_{BU}(\alpha)$ 的表达式为:

$$C_{BU}(\alpha) = nmC_{PD}[\alpha S_P + (1-\alpha)S_D] \quad (6)$$

式中: $C_{PD}$ 为风电项目建筑单位成本,单位为元/kW; $S_P$ 、 $S_D$ 分别为PMSG和DFIG的单机容量。

风电机组购置费 $C_{TT}(\alpha)$ 的表达式为:

$$C_{TT}(\alpha) = nm[\alpha S_P C_1 + (1-\alpha)S_D C_2] \quad (7)$$

式中: $C_1$ 、 $C_2$ 分别为含塔筒的PMSG和DFIG整机购置价格,单位为元/kW。

安装工程费 $C_{INS}(\alpha)$ 的表达式为:

$$C_{INS}(\alpha) = nm[\sigma_P \alpha S_P + \sigma_D (1-\alpha)S_D] \quad (8)$$

式中: $\sigma_P$ 、 $\sigma_D$ 分别为PMSG和DFIG的单位容量安装工程费单价。

建设投资利息 $C_{INT}(\alpha)$ 的表达式为:

$$C_{INT}(\alpha) = \gamma [C_{BU}(\alpha) + C_{TT}(\alpha) + C_{INS}(\alpha)] \quad (9)$$

式中:  $\gamma$  为一般利息, 约占建设成本的 2%~5%<sup>[4]</sup>。

因此, 考虑机型占比的初始建设投资成本  $C_{IC}(\alpha)$  为:

$$C_{IC}(\alpha) = C_{BU}(\alpha) + C_{TT}(\alpha) + C_{INS}(\alpha) + C_{INT}(\alpha) \quad (10)$$

2) 运维成本  $C_{OC}(\alpha)$ 。

运维成本包括运行成本、损耗成本和风电场维护成本。第  $t$  年的运行成本  $C_{OI}$  如附录 B 式 (B3) 所示。

损耗成本主要包括变电站和线缆所产生的损耗成本, 第  $t$  年的损耗成本  $C_{LI}$  为:

$$C_{LI} = C_{loss\_sub} + C_{loss\_cab} \quad (11)$$

$$C_{loss\_sub} = \chi_{loss\_sub} T_{tot}(\alpha) \times 8\,760 C_{FIT} \quad (12)$$

式中:  $C_{loss\_sub}$  为变电站损耗;  $C_{loss\_cab}$  为线路损耗, 计算公式如附录 B 式 (B4)、(B5) 所示;  $\chi_{loss\_sub}$  为变电站损耗率;  $T_{tot}(\alpha)$  为风电场的总装机容量;  $C_{FIT}$  为上网电价。

DFIG 的维护成本为:

$$C_{D}(\alpha) = nm(1-\alpha)C_{s\_D} = nm(1-\alpha)(C_{GB}f_{GB} + C_{VFD\_D}f_{VFD\_D}) \quad (13)$$

式中:  $C_{s\_D}$  为单台 DFIG 维护成本;  $C_{GB}$ 、 $f_{GB}$  分别为 DFIG 齿轮箱维护成本和频次;  $C_{VFD\_D}$ 、 $f_{VFD\_D}$  分别为 DFIG 变流器维护成本和频次。

PMSG 的维护成本为:

$$C_{P}(\alpha) = nm\alpha C_{s\_P} = nm\alpha(C_M f_M + C_{VFD\_P} f_{VFD\_P}) \quad (14)$$

式中:  $C_{s\_P}$  为单台 PMSG 维护成本;  $C_M$ 、 $f_M$  分别为 PMSG 的维护成本和频次;  $C_{VFD\_P}$ 、 $f_{VFD\_P}$  分别为 PMSG 变流器维护成本和频次。

因此, 考虑机型占比的运维成本  $C_{OC}(\alpha)$  为:

$$C_{OC}(\alpha) = C_{LI} + C_{OI} + C_{D}(\alpha) + C_{P}(\alpha) \quad (15)$$

3) 退役报废成本  $C_{DC}(\alpha)$ 。

关于机型占比的退役报废成本模型可表示为:

$$C_{DC}(\alpha) = C_{re} + C_{sc} + C_{wr} \quad (16)$$

式中:  $C_{re}$  为风机退役成本, 计算公式如附录 B 式 (B6) 所示;  $C_{sc}$  为场地清理费用,  $C_{wr}$  为回收费用, 场地清理费用  $C_{sc}$  与回收费用  $C_{wr}$  的总和占建筑工程费  $C_{BU}$  的 10%<sup>[22]</sup>。

考虑到风电场项目通常拥有较长的运营周期, 将各项成本与收益通过贴现率折现到项目生命周期的初期来进行衡量。因此, 经折算后的混合风电场成本模型  $C_{LCC}$  为:

$$C_{LCC} = C_{IC}(\alpha) + \sum_{t=0}^T \frac{C_{OC}(\alpha, t)}{(1+r)^t} + \frac{C_{DC}(\alpha)}{(1+r)^T} \quad (17)$$

式中:  $C_{OC}(\alpha, t)$  为运营期内第  $t$  年的运维费用;  $r$  为综合资金贴现率。

## 2.3 含机型占比的混合风电场收益模型

混合风电场收益主要包含发电收益与环境收益两部分, 如附录 A 图 A3 所示。

1) 发电收益  $C_{GPB}$ 。

发电收益主要取决于风电场的上网发电量  $E$  与上网电价  $C_{FIT}$ 。上网发电量与风电场风能资源和风电机组发电效率相关。风电场风能资源大小由风速概率密度函数  $f(v_w)$  表征<sup>[23]</sup>, 如附录 B 式 (B7) 所示。混合风电场中 PMSG 和 DFIG 的平均输出功率  $P_{LP}$  与  $P_{LD}$  如附录 B 式 (B8) 所示。单条 PMSG 和 DFIG 集电线路内的总输出功率  $P_{line\_P}$  和  $P_{line\_D}$  如附录 B 式 (B9) 所示。

全年按 8 760 h 计, 混合风电场全年上网发电量  $E(\alpha)$  为:

$$E(\alpha) = 8\,760(m_1 P_{line\_P} + m_2 P_{line\_D})\lambda = 8\,760m[\alpha P_{line\_P} + (1-\alpha)P_{line\_D}]\lambda \quad (18)$$

式中:  $\lambda$  为综合折减系数, 是实际发电量与理论发电量的比值, 一般取 80%~90%<sup>[24]</sup>。

由于不同风电资源区的上网电价不同, 本文采用年等效发电小时数对混合风电场规划项目所属的风电资源区进行评估。考虑机型占比的混合风电场年等效发电小时数  $E_A$  可表示为:

$$E_A = \frac{E(\alpha)}{T_{tot}(\alpha)} = \frac{E(\alpha)}{m\alpha S_P + m(1-\alpha)S_D} \quad (19)$$

根据式 (19) 得到的年等效发电小时数  $E_A$ , 参照附录 C 表 C1 所示的不同风电资源区划分, 即可确定混合风电场所属的风电资源区, 进而可根据附录 C 表 C2 确定其对应的上网电价  $C_{FIT}$ 。

因此, 关于机型占比的混合风电场发电收益  $C_{GPB}(\alpha)$  可表示为:

$$C_{GPB}(\alpha) = C_{FIT}E(\alpha) \quad (20)$$

2) 环境收益  $C_{EB}$ 。

本文采用碳排放配额价格来衡量碳排放的经济价值。全生命周期内第  $t$  年的碳排放配额平均交易价格  $C_x(t)$ <sup>[25]</sup> 如附录 B 式 (B10) 所示。

第  $t$  年的环境效益  $C_{EBt}(\alpha)$  可表示为:

$$C_{EBt}(\alpha) = F_{CER}E(\alpha)C_x(t) \quad (21)$$

式中:  $F_{CER}$  为碳减排因子, 其值为 0.997 kg/(kW·h)<sup>[26]</sup>。

因此, 混合风电场经折算后的收益模型为:

$$C_{LLR}(\alpha) = C_{GPB}(\alpha) + C_{EB}(\alpha) = \sum_{t=0}^T \frac{C_{FIT}E(\alpha)}{(1+r)^t} + \sum_{t=0}^T \frac{C_{EBt}(\alpha)}{(1+r)^t} \quad (22)$$

## 3 兼顾小信号稳定性的混合风电场经济性机型占比优化策略

### 3.1 混合风电场多经济指标优化目标函数

基于式 (17) 和式 (22), 将净现值  $V_{NP}$  和度电成本

$C_{LCOE}$  重新表示为关于机型占比  $\alpha$  的函数,即:

$$\begin{cases} V_{NP}(\alpha) = C_{LIR}(\alpha) - C_{LCC}(\alpha) \\ C_{LCOE}(\alpha) = C_{LCC}(\alpha) / T_E(\alpha) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $T_E(\alpha)$  为折现至项目全生命周期初期的单机总发电量,如式(24)所示。

$$T_E(\alpha) = \sum_{t=0}^T \frac{E_A}{(1+r)^t} \quad (24)$$

假设每年上网发电量恒定,项目投资方的核心目标为最大净现值  $V_{NP}(\alpha)$  与最小度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$ ,但二者在以下场景中存在冲突。

1) 由式(19)、(23)、(24)可知,在总发电量  $E(\alpha)$  固定的情况下,年等效发电小时数  $E_A$  越大,度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  越小,由附录C表C2可知,上网电价  $C_{FIT}$  越低。根据式(20)、(22)、(23)可知,这最终导致净现值  $V_{NP}(\alpha)$  变小,无法实现所期望的最大净现值与最小度电成本的目标。

2) 由式(23)可知,净现值  $V_{NP}(\alpha)$  最大化要求提升收益  $C_{LIR}(\alpha)$ ,需增加高收益机型的占比,但这可能增加投资与运维成本,进而导致度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  过高。而度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  最小化需降低单位发电成本,这要求采用低造价机型,但可能牺牲长期发电收益,导致净现值  $V_{NP}(\alpha)$  降低。

因此,在规划混合风电场机型占比时,需通过多目标优化方法对净现值  $V_{NP}(\alpha)$  和度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  进行权衡,同时将小信号稳定作为优化的约束条件。含机型占比的混合风电场多目标经济指标优化函数为:

$$\begin{cases} \max V_{NP}(\alpha) \\ \min C_{LCOE}(\alpha) \end{cases} \quad \alpha \in [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}] \quad (25)$$

式中:  $\alpha_{\max}$ 、 $\alpha_{\min}$  分别为保证混合风电场能够全风速稳定运行的最大和最小机型占比值。机型占比  $\alpha$  的约束由1.2节的小信号稳定运行域确定。

### 3.2 混合风电场机型占比优化方法

由3.1节分析可知,混合风电场经济优化属于多目标优化问题<sup>[27-28]</sup>,本文采用NSGA-II<sup>[29]</sup>对其进行求解寻优,以获取净现值  $V_{NP}(\alpha)$  和度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  的Pareto前沿解集,并通过TOPSIS求得最优解,即兼顾经济性和小信号稳定性的最优机型占比方案。

基于NSGA-II的混合风电场机型占比配置优化方法如附录A图A4所示,步骤如下。

1) 初始化混合风电场相关数据。

2) 构建含机型占比  $\alpha$  的混合风电场二元导纳模型,根据串补度求解稳定运行域,进而确定系统全风速稳定运行的机型占比范围  $[\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ 。

3) 分别建立式(17)及式(22)所示的混合风电场成本与收益模型。

4) 建立式(25)所示的含机型占比的混合风电场多目标经济指标优化模型。

5) 采用NSGA-II求净现值  $V_{NP}(\alpha)$  和度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  的Pareto前沿解集,NSGA-II求解的流程如附录A图A5所示。

6) 由于  $V_{NP}$  与  $C_{LCOE}$  是风电项目经济性评价的2个同等重要的目标<sup>[30]</sup>,基于步骤5)中得到的Pareto前沿解集,采用等权重TOPSIS求解最优机型占比。具体步骤为:首先,将Pareto解集中的净现值  $V_{NP}(\alpha)$  归一化至区间  $[0, 1]$  内,并在将度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  归一化至区间  $[0, 1]$  后进行倒序排列;其次,定义归一化后  $V_{NP}(\alpha)$ - $C_{LCOE}(\alpha)$  平面内的理想点为(1, 1),对应最大净现值  $V_{NP}(\alpha)$  与最小度电成本  $C_{LCOE}(\alpha)$  的理论状态;最后,计算每个解与该理想点之间的欧氏距离,选取距离最小的解所对应的机型占比作为兼顾经济性和小信号稳定性的最优机型占比方案。

## 4 案例研究

本章将对混合风电场风速-机型占比稳定运行域分析方法的有效性进行验证,并以4种典型风电资源区的风电场为例,对所提兼顾稳定性的混合风电场经济性机型占比优化方法进行验证。在所有案例中,风电场均规划1000台机组,总装机容量为2000 MW,风电场的全生命周期为20 a。具体的风电场相关参数如附录C表C3—C6所示。

### 4.1 混合风电场稳定运行域分析方法验证

工程实际中串补度一般在30%~50%内,本文选取30%串补度作为案例研究的典型场景,由图2(b)可知,此时系统能全风速稳定运行所对应的机型占比范围为[69%, 91%]。为进行有效性验证,在图2(b)的稳定运行域边界处取2个临界工况点作为参考点,如图3所示。

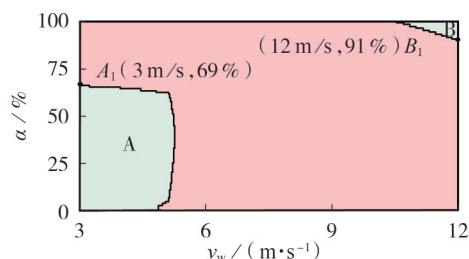


图3 30%串补度下混合风电场稳定运行域

Fig.3 Stable operation domain of hybrid wind farm under series compensation degree of 30%

首先,以临界工况点  $A_1$  (3 m/s, 69%) 为参考,取其邻近工况点  $A_{11}$  (3 m/s, 70%) 和  $A_{12}$  (3 m/s, 68%)。其中:  $A_{11}$  位于稳定运行域内,属于稳定工作点;  $A_{12}$  位于稳定运行域外,属于不稳定工作点。仿真验证结果如图4(a)所示。系统在2 s时投入串补,

工况点 $A_{11}$ 的并网电流经短暂超调后收敛至稳定,证明 $A_{11}$ 为稳定运行点。工况点 $A_{12}$ 的并网电流逐步振荡发散,证明 $A_{12}$ 为不稳定工作点。

其次,以临界工况点 $B_1(12\text{ m/s}, 91\%)$ 为参考,取其邻近2个工况点 $B_{11}$ 和 $B_{12}$ ,工况点 $B_{11}$ 的机型占比 $\alpha=92\%$ ,工况点 $B_{12}$ 的机型占比 $\alpha=91\%$ 。仿真时风速均从 $11.7\text{ m/s}$ 增至 $12\text{ m/s}$ 。工况点 $B_{11}$ 的机型占比大于 $91\%$ ,系统无法实现全风速稳定运行。工况点 $B_{12}$ 的机型占比为 $91\%$ ,系统能够在全风速工作空间内稳定运行。仿真验证结果如图4(b)所示。风速提升后,工况点 $B_{11}$ 的并网电流逐渐振荡发散,而工况点 $B_{12}$ 的并网电流始终保持稳定。

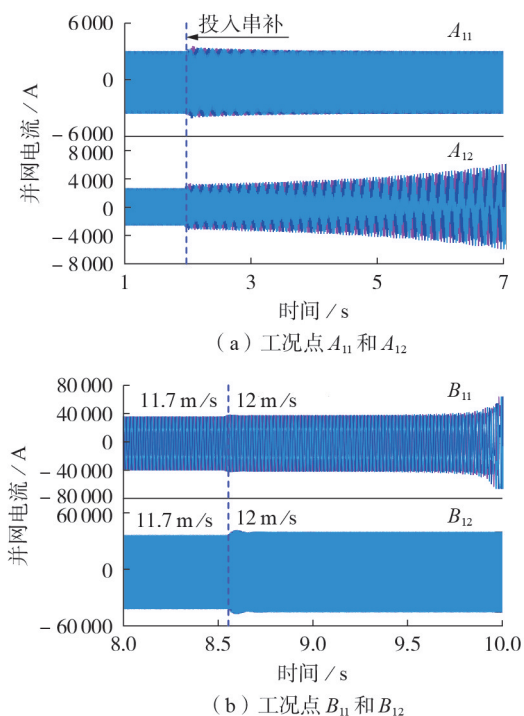


图4 稳定运行域分析方法仿真验证

Fig.4 Simulation verification results of stable operation domain analysis method

最后,选取机型占比为 $75\%$ ,该值位于全风速稳定运行机型占比区间 $[69\%, 91\%]$ 内。将风速从 $3\text{ m/s}$ 逐渐增至 $12\text{ m/s}$ ,混合风电场的并网点有功功率波形如附录A图A6所示。可以看出,随着风速逐步增大,并网点有功功率始终保持稳定。

综上,上述仿真验证案例证明了所提风速-机型占比稳定运行域分析方法的有效性。

#### 4.2 4种典型风电资源区算例分析

以4种典型风电资源区进行兼顾稳定性的混合风电场经济性机型占比优化案例分析,取串补度为 $30\%$ ,为满足更为安全稳定的规划需求,将图2(b)中的强稳定运行域作为约束。4种风电场的相关数据如附录C表C7所示。

以风电场1为例,首先设置NSGA-II参数。设置种群大小为100,最大迭代次数为200,交叉概率为 $80\%$ ,Pareto前沿个体保留比例为 $0.6$ 。为了兼顾小信号稳定性,NSGA-II约束上、下限分别设置为 $0.88, 0.75$ 。

采用NSGA-II求解关于机型占比的度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 以及净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 的Pareto前沿解集,如图5(a)所示。随着机型占比由 $0.75$ 增至 $0.88$ ,度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 和净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 均呈现升高的趋势,证明了净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 最大与度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 最小的目标存在冲突。

归一化后混合风电场的 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)-V_{\text{NP}}(\alpha)$ 前沿解集如图5(b)所示。前沿解集中任意一点 $P$ 与理想点 $T_i(1.0, 1.0)$ 间的欧氏距离为 $z_T$ , $z_T$ 越小表示前沿解集点 $P$ 与净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 最大与度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 最小的优化目标越接近,而最短的欧氏距离即代表所有前沿解集中最符合优化目标的解。图中, $x_N, y_L$ 分别为欧氏距离 $z_T$ 在净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 与度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 这2个方向上的投影,可以用来衡量前沿解集点 $P$ 所对应的净现值与度电成本大小。

基于图5(b)遍历所有前沿解集点的欧氏距离,可得到最优机型占比配置结果,如图5(c)所示。图5(c)横轴机型占比 $\alpha$ 的约束范围 $[0.750, 0.880]$ 被等分为10个子区间,每个子区间对应的结果为 $\alpha$ 取遍区间内所有值得到的欧氏距离最小时对应的结果。最优解对应的欧氏距离在 $\alpha$ 所有取值中最小,说明相应子区间内的某一个前沿解集点是最符合净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 最大与度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 最小优化目标的解,该前沿解集点所对应的机型占比 $\alpha=0.814$ ,相应的净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 为140.9亿元,度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 为 $0.2259\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

当不考虑稳定性约束时,将机型占比约束范围改为 $[0, 1]$ ,其余参数保持不变。按相同步骤,得到风电场1的最优机型占比配置结果,如附录A图A7所示。在不考虑稳定性约束时,最优机型占比 $\alpha$ 为 $0.414$ 。然而,在串补度为 $30\%$ 时,风电场1能全风速强稳定运行的机型占比范围为 $[0.750, 0.880]$ 。按机型占比 $0.414$ 规划将无法保证全风速空间稳定运行,存在振荡失稳风险。在经济性方面,最优机型占比对应的净现值 $V_{\text{NP}}(\alpha)$ 为120.0亿元,相较于考虑稳定性约束时的140.9亿元,收益降低了20.9亿元。而此时最优机型占比对应的度电成本 $C_{\text{LCOE}}(\alpha)$ 为 $0.2224\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,相较于考虑稳定性约束时的 $0.2259\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,成本降低了 $0.0035\text{ 元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

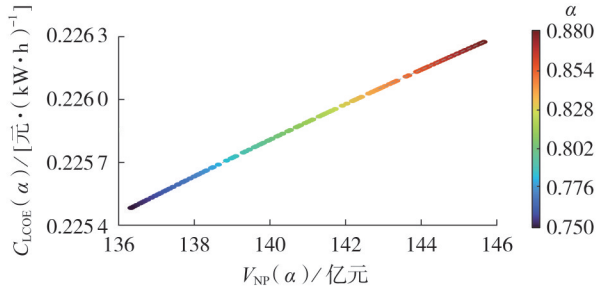
同理,可以计算得到风电场2—4在考虑稳定性与不考虑稳定性2种情况下的最优机型占比配置结果。限于篇幅,此处不再详细阐述,所有最优机型占

比配置结果如图6所示。通过对比,可以得到以下结论。

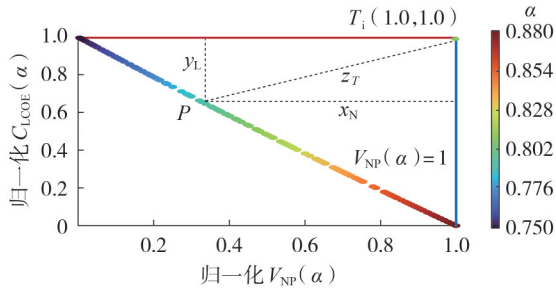
1)在不考虑稳定性约束时,所有类型风电场的最优机型占比计算结果均会超出全风速强稳定运行机型占比范围 $[0.750, 0.880]$ ,此时系统存在振荡失稳风险。

2)稳定性约束条件对所有类型风电场的收益与成本都有较大影响,具体表现为:相较于不考虑稳定性约束的情况,考虑稳定性约束时的净现值 $V_{NP}(\alpha)$ 和度电成本 $C_{LCOE}(\alpha)$ 更大。

3)风电场资源越丰富,相应的净现值 $V_{NP}(\alpha)$ 更大,度电成本 $C_{LCOE}(\alpha)$ 更小。从经济性角度考虑,在混合风电场项目规划前期,要尽量选择风电资源相



(a) 混合风电场的 $C_{LCOE}(\alpha)$ - $V_{NP}(\alpha)$ 前沿解集



(b) 归一化后混合风电场的 $C_{LCOE}(\alpha)$ - $V_{NP}(\alpha)$ 前沿解集

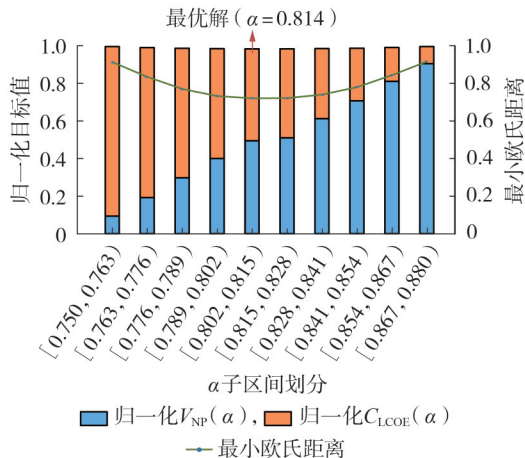
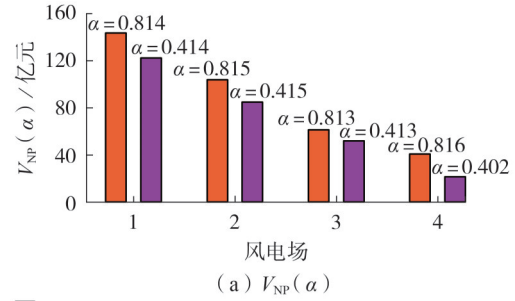
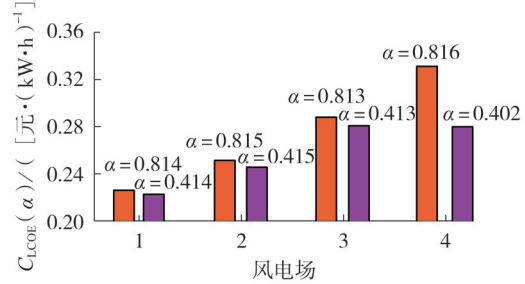


图5 兼顾经济性与稳定性的混合风电场最优机型占比优化配置结果

Fig.5 Optimization allocation results of optimal turbine ratio for hybrid wind farm considering economy and stability



(a)  $V_{NP}(\alpha)$



(b)  $C_{LCOE}(\alpha)$

图6 不同风电场最优机型占比下的结果

Fig.6 Results under different optimal turbine type ratio of wind farm

对丰富的地区。

## 5 结论

针对大规模风电场分期规划建设需求,围绕经济性DFIG、PMSG机型占比优化问题,本文提出兼顾小信号稳定性与经济性的混合风电场机型占比优化策略,得到如下结论。

1)相较于三维波特图分析法,本文所提风速-机型占比稳定运行域分析方法能刻画系统全风速稳定运行的机型占比范围,可为经济性机型占比优化提供小信号稳定约束边界。

2)混合风电场的经济性机型占比配置属于多目标优化问题,无法同时满足净现值最大和度电成本最小的目标要求,在稳定性约束下通过NSGA-II得到Pareto前沿解集,再利用TOPSIS得到最优解,即可获得兼顾稳定性与经济性的最优机型占比及其对应的净现值和度电成本。

3)不考虑稳定性约束时所计算得到的最优机型占比会超出全风速稳定运行的机型占比范围,混合风电场存在振荡失稳风险。风电场前期规划需通过稳定运行域将小信号稳定约束转化为全风速机型占比约束,再进行机型占比优化配置。

本文优化策略主要基于系统稳定与失稳之间的定性约束。未来笔者将进一步开展稳定性裕度与经济性指标的量化关系研究,完善混合风电场规划阶段的稳定性与经济性精准体系。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 李世峰,朱国云. “双碳”愿景下的能源转型路径探析[J]. 南京社会科学, 2021(12): 48-56.  
Li Shifeng, Zhu Guoyun. Analysis of solutions to the energy transition, from the perspective of “carbon-peak and carbon-neutralization” [J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2021(12): 48-56.
- [2] 姚骏,余梦婷,陈知前,等. 电网对称故障下含DFIG和PMSG的混合风电场群的协同控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(15): 26-36.  
Yao Jun, Yu Mengting, Chen Zhiqian, et al. Coordinated control strategy for hybrid wind farms with DFIG and PMSG under symmetrical grid faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(15): 26-36.
- [3] 李东东,罗丁,孙梦显,等. 适用于VSC-HVDC和PMSG并网系统的宽频振荡稳定性判据及阻尼优化控制[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(4): 110-117.  
Li Dongdong, Luo Ding, Sun Mengxian, et al. Broadband oscillation stability criteria and damping optimization control for VSC-HVDC and PMSG grid-connected system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(4): 110-117.
- [4] 丰力,张莲梅,韦家佳,等. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J]. 中国电力, 2024, 57(9): 80-93.  
Feng Li, Zhang Lianmei, Wei Jiajia, et al. Development & thinking of offshore wind power based on life cycle economic evaluation[J]. Electric Power, 2024, 57(9): 80-93.
- [5] 秦初升,高瑜,王俊花,等. 基于全寿命周期成本的风电场工程规划优化设计研究[J]. 水力发电, 2013, 39(5): 80-83.  
Qin Chusheng, Gao Yu, Wang Junhua, et al. Design optimization of wind farms based on life cycle cost[J]. Water Power, 2013, 39(5): 80-83.
- [6] 沈剑飞,翟相彬. 基于全寿命周期下风电场的成本控制[J]. 科技和产业, 2013, 13(10): 92-96.  
Shen Jianfei, Zhai Xiangbin. The wind power plant cost control based on life-cycle theory[J]. Science Technology and Industry, 2013, 13(10): 92-96.
- [7] 李博,刘正富,江健健,等. 考虑尾流效应的海上风电宽频振荡稳定特性聚合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(12): 118-126.  
Li Bo, Liu Zhengfu, Jiang Jianjian, et al. Aggregation analysis method for wide-band oscillation stability characteristics of offshore wind power considering wake effect[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(12): 118-126.
- [8] Laura C S, Vicente D C. Life-cycle cost analysis of floating offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2014, 66: 41-48.
- [9] 陈继开,李平,常旗峰,等. 含SVG的双馈风电场风速变化条件下高频谐振问题分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(5): 38-50.  
Chen Jikai, Li Ping, Chang Qifeng, et al. Analysis of high frequency resonance problem in doubly-fed wind field systems with SVG with wind speed variation[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(5): 38-50.
- [10] Amin M, Molinas M. Understanding the origin of oscillatory phenomena observed between wind farms and HVDC systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 378-392.
- [11] Sun K, Yao W, Wen J. Interaction between PMSG and DFIG in a hybrid wind farm integrated through a VSC-HVDC[C]// The 10th Renewable Power Generation Conference. London: IET, 2021: 529-534.
- [12] Wang J, Jia Q, Yan G, et al. Analysis of subsynchronous oscillation characteristics of hybrid-based wind farm connected with fixed series compensation system[C]// 2021 IEEE 16th Conference on Industrial Electronics and Applications. [S.l.]: IEEE, 2021: 1579-1584.
- [13] 辛建波,舒展,赵诗萌,等. 双馈-直驱混合风电场次同步振荡影响因素分析[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(11): 24-32.  
Xin Jianbo, Shu Zhan, Zhao Shimeng, et al. Research on influencing factors of DFIG-PMSG hybrid wind farm sub-synchronous oscillations[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(11): 24-32.
- [14] 王国宁,杜雄,邹小明,等. 用于三相并网逆变器稳定性分析的自导纳和伴随导纳建模[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3973-3981.  
Wang Guoning, Du Xiong, Zou Xiaoming, et al. Self and accompanying admittance model for three-phase grid-tied inverter stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3973-3981.
- [15] 邹小明. 风电并网系统全风速工作空间内的稳定性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
Zou Xiaoming. Stability Investigation for wind power grid connected system in the entire wind speed operation space[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [16] Du C M, Du X, Tong C H. SSR stable wind speed range quantification for DFIG-based wind power conversion system considering frequency coupling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(1): 125-139.
- [17] Zou X M, Du X, Tai H M. Two-variable admittance model for D-PMSG-based wind turbine and stability criterion based on magnitude and phase contour plot[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(2): 1484-1498.
- [18] 聂永辉,张德伟,高磊,等. MMC型柔性直流输电系统的中高频振荡无源阻尼抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 141-149.  
Nie Yonghui, Zhang Dewei, Gao Lei, et al. Passive damping suppression strategy for medium and high frequency oscillations in MMC type flexible DC transmission systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(16): 141-149.
- [19] 王鑫,程启明,陈炯,等. 基于阻抗分析法的双馈风电场并网系统的次同步振荡分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(1): 133-144.  
Wang Xin, Cheng Qiming, Chen Jiong, et al. Subsynchronous oscillation analysis of grid-connected doubly fed wind farm system based on impedance analysis method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(1): 133-144.
- [20] 陈青恒,袁晓杰,何宇俊,等. 投资开放模式下基于全寿命周期分析的离网型微网投资与优化[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2448-2455.  
Chen Qingheng, Yuan Xiaojie, He Yujun, et al. Investment and optimization of off-grid microgrid projects based on life-cycle cost/benefit analysis with open investment mode[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2448-2455.
- [21] 严彦,许昌,刘德有,等. 基于遗传算法的风电场微观选址优化研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 526-532.  
Yan Yan, Xu Chang, Liu Deyou, et al. Optimization research of wind farm micro siting based on genetic algorithm[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013, 34(3): 526-532.
- [22] Ioannou A, Angus A, Brennan F. Parametric CAPEX, OPEX, and LCOE expressions for offshore wind farms based on global deployment parameters[J]. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2018, 13(5): 281-290.
- [23] 王稳稳,胡仁祥,马瑞,等. 吐鲁番地区典型风能特性分析[J].

- 内蒙古电力技术,2022,40(6):17-23.
- Wang Wenwen,Hu Renxiang,Ma Rui,et al. Analysis of typical wind energy characteristics in Turpan[J]. Inner Mongolia Electric Power,2022,40(6):17-23.
- [24] 宋冬然,梁梓昂,夏鄂,等. 风电全生命周期成本建模与经济分析综述[J]. 热力发电,2023,52(3):1-12.
- Song Dongran,Liang Ziang,Xia E,et al. Overview of wind power life-cycle cost modeling and economic analysis[J]. Thermal Power Generation,2023,52(3):1-12.
- [25] 黄国日,尚楠,梁梓杨,等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术,2024,48(2):668-678.
- Huang Guori,Shang Nan,Liang Ziyang,et al. Research on the linkage mechanism between green power consumption and the carbon market[J]. Power System Technology,2024,48(2):668-678.
- [26] 周雄勇,许志端,郝永勤. 中国节能减排系统动力学模型及政策优化仿真[J]. 系统工程理论与实践,2018,38(6):1422-1444.
- Zhou Xiongyong,Xu Zhiduan,Xi Yongqin. The system dynamic model and policy optimized simulation of energy conservation and emission reduction in China[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2018,38(6):1422-1444.
- [27] 蔡镗涵,管霖,张野,等. 考虑多目标全场景的大规模光伏集群送端系统无功优化配置[J]. 电力系统自动化,2025,49(7):91-102.
- Cai Zihan,Guan Lin,Zhang Ye,et al. Optimal configuration of reactive power for large-scale photovoltaic cluster sending-end system considering multiple objectives and all scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(7):91-102.
- [28] 白顺明,陈磊,姜飞,等. 考虑风电最大化消纳的电力系统多目标优化[J]. 电气技术,2020,21(1):7-11.
- Bai Shunming,Chen Lei,Jiang Fei,et al. Multi-objective optimal model for power system considering wind power maximum accommodation[J]. Electrical Engineering,2020,21(1):7-11.
- [29] 马梓耀,张博,张璐,等. 考虑经济性与韧性均衡的交直流混合配电网协调规划[J]. 电力系统自动化,2025,49(6):78-87.
- Ma Ziyao,Zhang Bo,Zhang Lu,et al. Coordinated planning for AC/DC hybrid distribution networks considering equilibrium between economy and resilience[J]. Automation of Electric Power Systems,2025,49(6):78-87.
- [30] Wu J H,Wang T G,Wang L,et al. Impact of economic indicators on the integrated design of wind turbine systems[J]. Applied Sciences,2018,8(9):1668.
- 作者简介:**  
王浩成(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力电子系统稳定性(E-mail:whc@stu.cqu.edu.cn);  
杜雄(1979—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力电子系统稳定性与电力电子可靠性(E-mail:duxiong@cqu.edu.cn)。
- (编辑 王锦秀)

## Optimization strategy for turbine type ratio of hybrid wind farm considering small-signal stability and economy

Wang Haocheng<sup>1</sup>,Tu Yingang<sup>1</sup>,Qiu Ziming<sup>1</sup>,Zou Xiaoming<sup>2</sup>,Du Xiong<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Power Transmission and Transformation Equipment Technology,Chongqing University, Chongqing 400044,China;

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

**Abstract:** The current optimal configuration for turbine type ratio of hybrid wind farm mostly takes the economic benefit as the main object, which ignores the constraints of small signal stability of the system. Therefore, an optimization strategy for turbine type ratio of hybrid wind farm is proposed considering small signal stability and economy. The small signal model of whole wind speed interval for hybrid wind farm grid-connected system is constructed, and the analysis method of stable operation domain about wind speed and turbine type ratio is proposed. The whole life cycle economic model of hybrid wind farm is built containing turbine type ratio, the stable operation domain is taken as the constraint, and the multi-objective optimization model with the goal of highest net present value and lowest levelized cost of electricity is constructed. The nondominated sorting genetic algorithm II is adopted to obtain the frontier solution set of turbine type ratio considering the stability and economy, and the technique for order preference by similarity to an ideal solution is used to give the optimal turbine type ratio scheme. The effectiveness of the proposed strategy is verified by the example analysis of four typical wind resource areas. The research results show that the constraints of small signal stability significantly impact the optimal turbine type ratio scheme of hybrid wind farm, which needs to be considered in the economic planning stage of wind farm.

**Key words:** hybrid wind farm; wind power; turbine type ratio of wind farm; small signal stability; stability analysis; stable operation domain; economy