风电功率小波包分解结合储能模糊控制的配电网多目标优化

熊 雄,叶 林,杨仁刚

(中国农业大学信息与电气工程学院,北京市 100083)

摘要:将风力发电(以下简称风电)分散式接入中低压配电网,采用就地消纳的模式是大规模风电集中并网、远距离输送供电模式的一种较好的补充方式。通过对高渗透率分布式风电功率进行小波包分解,确定了并入电网功率及能量型、功率型储能的充放电功率指令,并提出了一种确定小波包分解层数及频段的优化方法,即以分解层数和频段为控制变量,建立电网总电压偏差最小、总有功网损最小、总电压闪变裕度最大、能量型储能等效寿命损耗最小的多目标函数,进而解得最优分解下并入电网的低频功率及混合储能的中、高充放电功率指令。为使频繁充放电的功率型储能荷电状态(SOC)处于合理的状态,采用模糊理论对其进行自适应控制,并根据模糊控制器的输出修正风电功率最优分解。最后,通过对基于 IEEE 33 节点算例的分析计算,验证了所提方法的正确性及有效性。

关键词: 配电网; 风力发电; 分散式接入; 混合储能系统; 小波包分解; 模糊控制

0 引言

由于风力发电(以下简称风电)的分布式接入模 式具有供电灵活、可有效延缓电网升级等优势,因而 是一种解决配电网供电问题的较好途径^[1]。但类似 于集中式并网发电,风电分散式接入中低压配电网 因风电自身的间歇性及波动性,势必会对联络节点 处的供电质量产生不良影响^[2],且风电基于电力电 子变换设备实现能量的控制,其运行状态与系统频 率和电压解耦,因此基本不具备惯性响应和调频调 压功能;又由于分散式接入风电不具备集中式风力 发电机群出力互补的特点,因此,风电的高渗透率接 入将加剧由其波动特性引发的诸多问题,如电压偏 差、电压闪变、网损等。

由于储能技术具备对功率、能量的时间快速迁移能力,因而是一种解决间歇性分布式电源(DG)发展瓶颈的有效途径^[3]。此外,应用于分布式风电的小容量储能系统从技术和经济角度更容易实现。目前对储能技术改善高渗透率分布式风电并网问题的研究仍然较少,相关研究主要集中于 DG 对配电网的影响指标以及利用储能技术平滑间歇性电源输出这2个方面。在 DG 对配电网的影响指标方面,文献[4]将电压影响指标作为单一研究对象,分析计算

了 DG 的接入容量及接入位置对配电网电压指标的 影响情况。文献「57以网损影响指标为单一研究对 象,通过对某配电网典型线路上不同 DG 的并网与 解列数据进行潮流计算,得到各 DG 对配电网络的 网损指标影响情况。文献[6]结合了网损及电压影 响指标,并考虑相关成本问题,通过一种改进的遗传 算法对配电网中的 DG 进行了位置及容量优化。上 述文献对 DG 的接入对配电网的影响指标进行了详 细的计算分析,但并未考虑间歇性电源的波动性,而 将风电机组或光伏发电设备视为稳定电源。在储能 平滑间歇性电源输出方面,主要方法包括频谱分析 法和时间常数法。常用的频谱分析法有离散傅里叶 变换法和小波包分解法,这2种方法均通过对风电 功率的频域分解得到储能充放电指令。其中,小波 包分解法在处理非平稳信号以获取更多的细节信息 时较傅里叶变换法更具优势,如文献[7-8]采用小波 包对风电场和光伏发电设备输出的功率信号进行了 多尺度分解,将低频稳定信号送入电网,并对高频信 号进一步分解,得到适合混合储能系统各自频率范 围的充放电指令。由于小波包的分解层数和频段数 往往是通过对原始信号进行快速傅里叶变换得到的 幅频信息加以分析而确定的,因而带有一定主观性。 时间常数法则主要以平抑后间歇性电源的输出波动 率为基础,确定最佳的低通滤波时间常数,并得到储 能充放电指令[9-12]。虽然时间常数法在确定时间常 数时较小波包分解法确定分解层数及频段数更为客 观,但在处理非平稳信号以获取更多细节信息时,小

收稿日期: 2014-07-09;修回日期: 2015-01-08。

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目 (2012AA050203);国家自然科学基金资助项目(51477174)。

波包分解法更具优势。此外,上述利用储能平抑间 歇性电源波动的文献往往是以原始信号的幅频特性 分析结果或平抑后间歇性电源的输出波动为基础, 提出平抑目标以指导平抑效果,不能直观地反映平 抑前后间歇性电源的输出波动对系统潮流指标所产 生的影响。因此,须寻求一种客观确定最佳小波包 分解层数及频段数的优化方法,使小波包在平抑间 歇性电源波动时更为完善。

本文综合上述2类文献研究,以配电网某段时 间内的累积电压偏差、累积电压闪变裕度、累积有功 损耗和电池储能累积等效寿命损耗为指标,建立多 目标优化模型,以指导分布式风电的平抑。在平抑 方法上,选取小波包分解法,并将分解的层数及频段 数作为多目标优化模型的底层自变量,进行寻优以 确定小波包的最佳分解。在混合储能充放电控制策 略上,采用模糊理论对混合储能系统中超级电容器 的荷电状态(SOC)进行自适应控制,以模糊控制器 的输出作为控制系统输出量,修正小波包最优分解 下的混合储能充放电指令。

1 基于电网指标与电池寿命损耗的多目标 优化函数

一定渗透率的风电分散式接入会改善辐射状、 单向潮流的配电网多项指标。当风电渗透率提高并 超过某一限度时,其自身间歇性、波动性将更为突 出,从而对系统网损、电压等指标造成严重的影响。 相关研究表明,DG的极限渗透率为30%^[6]。为改 善高渗透率分布式风电的间歇性问题,采用混合储 能系统对其输出进行一定程度的平滑处理。在混合 储能系统中,能量型储能系统主要包括一些电池储 能;功率型储能系统则主要包括超级电容器、飞轮等 储能系统。在混合储能系统中,电池储能能量型储 能系统功率密度较小,且总循环次数有限,因此,在 平滑过程中应避免电池储能持续大功率充放电,避 免缩短其寿命损耗。综上所述,可建立如下以潮流 平衡为等式约束的多目标优化函数。

$$\begin{cases} \min f_{1} = \sum_{t} P_{loss}(t) \\ \min f_{2} = -\sum_{i} \sum_{t} \Delta P_{stz,i}(t) \\ \min f_{3} = \sum_{i} \sum_{t} \Delta U_{i}(t) \\ \min f_{4} = \sum_{t} \Delta L_{bat}(t, R) \\ \Delta L_{bat}(t, R) = \frac{\frac{1}{N_{t,R}}}{\frac{1}{N_{0}}} \times 100\%$$
(2)

$$N_{0} = \alpha_{1} + \alpha_{2} e^{-\alpha_{3}R} + \alpha_{4} e^{-\alpha_{5}R}$$
(3)

式中: f_1, f_2, f_3, f_4 分别为系统并入分布式风电功 率后某时间段内的总有功损耗、总电压闪变裕度、总 电压 偏 差 量 和 电 池 等 效 寿 命 损 耗; $\Delta U_i(t) =$ $|1-U_i(t)|$ 为母线 $i \ t t$ 时刻的电压偏差标幺值, 其中 $U_i(t)$ 为母线 $i \ t t$ 时刻的电压标幺值; $\Delta P_{\text{stz,i}}(t) = |1-P_{\text{stz,i}}(t)|$ 为母线 $i \ t t$ 时刻的有功网损标幺 值; $\Delta L_{\text{bat}}(t,R)$ 为 t 时段内电池储能以深度 R 充放 电时的等效寿命损耗; $N_{i,R}$ 为 t 时段内电池储能以 深度 R 满充满放标准下的最大循环次数; N_0 为标 准满充满放下的最大循环次数; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ 为 一组常数,可由对电池寿命测试数据进行回归模拟 获得^[13]。

由式(1)可知, f_1 , f_2 , f_3 取决于并入系统的风 电功率大小,而 f_4 则取决于电池储能能量型储能 系统的实际充放电指令。本文将经小波包分解后的 低频风电功率并入电网,根据能量型储能系统与功 率型储能系统各自的能量、功率密度和循环寿命特 点,依次承担分解的风电的中、高频功率。因此,可 将小波包分解所得的风电功率低、中、高频分量作为 控制变量,如式(4)所示。

 $X = \begin{bmatrix} P_{wind_{L}} & P_{wind_{M}} & P_{wind_{H}} \end{bmatrix}^{T}$ (4) 式中: $P_{wind_{L}}$, $P_{wind_{M}}$, $P_{wind_{H}}$ 分别为风电功率经小波 包分解所得的低频、中频、高频功率。

每组 P_{wind_L} , P_{wind_M} , P_{wind_H} 对应于一组 f_1 , f_2 , f_3 , f_4 值, 多目标优化下的最优解则为 $X_{opt} = [P_{wind_L_opt}, P_{wind_M_opt}, P_{wind_H_opt}]^T$,其中 $P_{wind_L_opt}$, $P_{wind_M_opt}$, $P_{wind_H_opt}$ 分別为最优解所对应的低频、中频、高频功率。在求解算法中,基于 Pareto 最优概 念的多目标演化算法是目前的研究热点^[14],且在 MATLAB优化工具箱中能方便地调用相关函数。 由于求解算法不是本文讨论的重点,在此不作详述。

2 风电功率的小波包最优分解

小波包分解法由小波变换法演变而来,可同时 对信号的高频和低频分量进行分解,有利于分析信 号的某些细节特征。某风电功率经3层小波包分解 后的示意图如附录A图A1所示。由该图可知,通 过不断分解形成结构上的二叉树,可将原信号映射 到2"个小波包子空间中(*n* 为分解层数)。

运用 Dmeyer 小波^[15] 对某日 24 h 内的风电功 率进行 6 层小波分解,并重构 6 层 64 个频段的功率 分量,分别假定 2⁰~2²,(2²+1)~2⁵,(2⁵+1)~ 2⁶ Hz 这 3 个频率段分别对应于低频信号、中频信 号、高频信号,所得的分解后的示例曲线如附录 A 图 A2 所示。

由附录 A 图 A2 可知,分解的低频功率与原始 功率曲线较为相似,但其波动程度则大幅度降低,可 大致反映原始信号,将其并入电网。中、高频分解信 号在 0 值附近上下波动,波动幅值远小于低频信号, 且波动程度远大于低频信号。

文中运用小波包将风电功率分解为低频、中频、 高频功率,分解结果如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{wind}_L} = P_{\text{wind}} (\boldsymbol{w}_{b}, 2^{0} : \boldsymbol{k}_{1}) \\ P_{\text{wind}_M} = P_{\text{wind}} (\boldsymbol{w}_{b}, (\boldsymbol{k}_{1}+1) : \boldsymbol{k}_{2}) \\ P_{\text{wind}_M} = P_{\text{wind}} (\boldsymbol{w}_{b}, (\boldsymbol{k}_{2}+1) : 2^{n}) \end{cases}$$
(5)

式中: $P_{wind}(\cdot)$ 为小波包分解后各频段的风电功率 函数; w_b 为所选用的小波基;n为分解的层数; k_1 和 k_2 分别为低频段数和高频段数, k_1 和 k_2 均为正整 数,且 $k_1 < k_2 < n$;":"表示区间,"2°: k_1 "表示从 2° 到 k_1 的区间,其余类推。

因此,可将 k₁,k₂,n 视为最底层自变量,由 式(4)得到式(6):

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} P_{\text{wind}}(\boldsymbol{w}_{\text{b}}, \boldsymbol{k}_{1}) & P_{\text{wind}}(\boldsymbol{w}_{\text{b}}, \boldsymbol{k}_{1}, \boldsymbol{k}_{2}) & P_{\text{wind}}(\boldsymbol{w}_{\text{b}}, \boldsymbol{k}_{2}, \boldsymbol{n}) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(6)

在求解算法中,将分解层数 n 置于外层循环, 反复调用 MATLAB 遗传算法工具箱求解当前 n 值 下的局部最优解和相应的 k_1 和 k_2 ,当 n 值循环达 到最大循环次数 N 时,通过各局部最优解的排序得 到全局最优解及此时的 k_1, k_2, n 的值(分别记为 $k_{1opt}, k_{2opt}, n_{opt}$),此时的小波包分解为最优分解,分 解 的 高 频、中 频、低 频 功 率 分 别 为 $P_{wind_L_opt}$, $P_{wind_M_opt}$ 和 $P_{wind_H_opt}$ 。

当系统包含 2 处分布式风电时,记另一处风电 功率的小波包分解层数为 m;最大循环次数为 M; 分解频段数为 r_1 和 r_2 ,则可得如图 1 所示的计算流 程。当系统含有 3 处分布式风电时,计算流程依次 类推。

3 基于模糊控制的混合储能系统充放电 策略

为使混合储能系统在每次充放电后的荷电状态 维持在合理状态,以提高其连续充放电能力,需对混 合储能系统荷电状态和充放电功率进行控制。以 S_E和 S_P分别表示能量型、功率型储能系统荷电状 态,由于在优化目标中对能量型储能的等效寿命损 耗进行了带权重因子的优化,小波包所分解的中频 功率指令在一定程度上可使能量型储能系统每次充 放电后的 S_E 维持在合理的状态。此外,由于功率 型储能能量密度较小,其 S_P 在每次充放电后容易 达到上/下限。针对以上问题,本文将制定如下混合 储能充放电策略。



图 1 目标函数求解算法基本流程 Fig.1 Basic procedure of multi-objective optimized function solving algorithm

1)当功率型储能当前的 S_P适中时,混合储能 系统正常充放电。

2)当功率型储能的 S_P 偏小且准备放电,或 S_P 偏大且准备充电时,基于模糊理论对其 S_P 进行控 制,以当前的 S_P 和下一个充电或放电段内所需 S_P 的变化值 ΔS_P 的计算值作为模糊输入,所需 ΔS_P 可由式(7)算得。将功率指令修正系数 K_P 作为输 出量,输入、输出变量的隶属函数及模糊规则^[16]分 别如附录 A 图 A3 及表 A1 所示。

$$\Delta S_{P} = \begin{cases} \frac{\eta_{c} \int_{t_{cl}}^{t_{c2}} P_{\text{wind}_{-H}}(t) dt}{E_{\text{cmax}}} & \hat{\Sigma} \neq 0 \\ \frac{\int_{t_{dl}}^{t_{d2}} P_{\text{wind}_{-H}}(t) dt}{\eta_{d} E_{\text{cmax}}} & \hat{D} \neq 0 \end{cases}$$
(7)

式中: η_{c} 和 η_{d} 分别为充、放电效率; t_{cl} 和 t_{c2} 分别为 某一充电时段的起、止时刻; t_{dl} 和 t_{d2} 分别为某一放 电时段的起、止时刻; E_{cmax} 为储能系统最大存储电 量;定义充电功率为正,放电功率为负。

3)修正后的功率型储能充放电指令与原始充放 电指令的差值将由能量型储能和系统共同承担,功 率在两者之间的分配由式(8)决定。

$$\begin{cases} \min \Delta f_1 = \sum_{t} (P_{\text{loss}}'(t) - P_{\text{loss}}(t)) \\ \min \Delta f_2 = \sum_{i} \sum_{t} (\Delta P_{\text{stz},i}(t) - \Delta P_{\text{stz},i}'(t)) \\ \min \Delta f_3 = \sum_{i} \sum_{t} (\Delta U_i'(t) - \Delta U_i(t)) \\ \min \Delta f_4 = \sum (\Delta L_{\text{bat}}'(t, R) - \Delta L_{\text{bat}}(t, R)) \end{cases}$$
(8)

式中: Δf_1 , Δf_2 , Δf_3 , Δf_4 分别为系统的总有功损 耗、总电压闪变裕度、总电压偏差量和电池等效寿命 损耗变化量; $\Delta P_{\text{stz},i}'(t)$ 为并入电网修正功率后母线 $i \alpha t$ 时刻的电压闪变裕度; $\Delta U_i'(t)$ 为并入电网修 正功率后母线 $i \alpha t$ 时刻的电压偏差; αt 时间段 内 $\Delta L_{\text{bat}}'(t,R)$ 为电池充放功率修正后的等效寿命 损耗。

以功率分配系数 $k_s(0 \le k_s \le 1)$ 为控制变量,决 定并入电网的修正功率(该值为 $P_{wind_L} + k_s P_{wind_H}$) 和电 池 充 放 电 修 正 功 率 (该 值 为 $P_{wind_M} + (1-k_s)P_{wind_H}$),进而计算修正后式(8)中各目标函 数的 值。 k_s 最优 解 的 求 解 过 程 同 样 通 过 调 用 MATLAB 优化工具箱完成。

4 算例仿真计算

IEEE 33 节点算例的拓扑架构如附录 A 图 A4 所示。该系统的首端电压为 12.66 kV,三相基准功 率为 10 MVA。将风电分别接入 Bus 24 和 Bus 28, 接入容量比例为 1:2,总负荷等级为 15 MW,接入 渗透率为 40%。Bus 24 和 Bus 28 处的风电功率 P_{wind24} 和 P_{wind28} 如图 2 所示。



本文分别选取蓄电池和超级电容器作为能量型 和功率型储能系统构成混合储能系统,两者允许的 放电深度分别为 80%和 95%,充电效率分别为 90%和 95%,放电效率分别为 90%和 95%。 运行优化程序,可得变量 n,m,k_1,k_2,r_1,r_2 的 最优解分别为 $n_{opt}=6,m_{opt}=12,k_{1opt}=4,k_{2opt}=15,$ $r_{1opt}=60,r_{2opt}=140,$ 超级电容器 SOC 经模糊控制 后的输出修正系数 K_s 如图 3 所示,Bus 24 和 Bus 28 处的功率分配系数 k_s 分别为-0.435和 -0.664_s



Fig.3 Output of fuzzy control

由图 3 可知, Bus 24 处的功率修正系数 K_s 在 10 h之前及 15 h之后维持在 0.8 上下,说明此段时 间内 Bus 24 处的超级电容器 SOC 值较合理,只需 微调;10~15 h之间,其 SOC 值需要较大的调节以 维持 SOC 在合理范围。Bus 28 处的 K_s 在全天范 围内变化幅值及频率均大于 Bus 24 处的 K_s ,说明 Bus 28 处的超级电容器承担的高频分解功率使其 SOC 长时间处于不合理状态。

Bus 24 和 Bus 28 处小波包最优分解后的风电 功率修正值和文献[7]中采用基于频谱分析的小波 包分解值分别如图 4 和图 5 所示。图中, P_{L1}, P_{M1}, P_{H1}分别为本文方法下的低频、中频、高频分量; P_{L2}, P_{M2}, P_{H2}分别为常规小波包分解下的低频、中 频、高频分量。中频、高频分量即为电池和超级电容 器的充放电指令。

将2组混合储能系统配置在 Bus 24 和 Bus 28 处,基于本文采用的分解方法进行配置,两处的电池与超级电容器最大充放电功率应分别大于各自风电功率分解下的 max $|P_{\rm MI}|$ 和 max $|P_{\rm HI}|$,最大容量则根据电池与超级电容器跟踪 $P_{\rm MI}$ 和 $P_{\rm HI}$ 指令后文献[17]规定的 10 min 风电功率最大功率变化要求值进行最低配置。综上所述,Bus 24 和 Bus 28 处混合储能中电池和超级电容器最大充放电功率同为300 kW 和 500 kW,最大容量同为 400 kW・h和50 kW・h,由于混合储能容量配置不是本文重点研究内容,因此不再详述。



and conventional decomposition

由图 4 和图 5 可知,常规方法下,电池充放电功 率时有超过最大充放电功率 300 kW,说明超级电容 器未能较好地跟踪充放电指令,导致更多的未跟踪 功率分配给了电池,且超级电容器充放电功率也有 超过最大充放电功率 500 kW 的情况。

2 种方法下,Bus 24 和 Bus 28 配置的混合储能 SOC 对比曲线如图 6 和图 7 所示。图中,超级电容器 SOC1 和电池 SOC1 为本文方法下所得曲线;超 级电容器 SOC2 和电池 SOC2 为常规小波包分解下 得到的曲线。

由图 6 和图 7 可直观看出,由于本文所采用的 方法对超级电容器的充放电过程进行了模糊自适应 控制,使得超级电容器 SOC 曲线较常规方法下的 SOC 曲线更为平衡,尤其是 Bus 28 处配置的超级 电容器更为明显,能较好地跟踪充放电指令。由于 本文使用的小波包优化分解中包含对电池等效寿命 的优化,因此,电池整体充放电的深度将低于较常规 方法。



Fig.7 SOC curves of composite storage system at Bus 28

现定义如下 5 种方案:方案 a 表示系统未接入 风电;方案 b 表示系统接入风电,未配置储能系统; 方案 c 表示在方案 b 的基础上配置储能系统,并采 用频谱分析的常规小波包分解方法;方案 d 表示在 方案 b 的基础上,采用文中提出的小波包优化分解 方法;方案 e 表示在方案 d 的基础上,通过对超级电 容器 SOC 进行模糊自适应控制,修正最优分解功 率。5 种方案下的各目标函数及其子目标值如表 1 所示。

表 1 各方案的子目标计算值 Table 1 Sub-objective calculating value of each scheme

	-			
方案	f_1	f_2	f_3	f_4
а	0.42	-3.45	1.85	0
b	0.44	-1.08	4.28	0
с	0.40	-2.87	1.79	0.12
d	0.32	-3.31	1.61	0.06
е	0.33	-3.12	1.72	0.08

对比方案 e,c,d 可见,本文采用的方案 e 所对 应的 f_1, f_2, f_3, f_4 值均优于基于频谱分析的常规 小波包分解方案 c,且 f_1, f_2, f_3 这 3 个电网指标远 优于未配置混合储能的方案 b。对比方案 a 和方案 e 可知,方案 e 的 f_2 值略逊于方案 a。这是因为模 糊控制器修正了最优分解下的低频分量,一定程度 上增加了并入电网低频功率的波动性。对比方案 e 和方案 d 可知,虽然方案 d 下的 f_1, f_2, f_3, f_4 值均 略优于方案 e,但方案 d 并未考虑一定容量的超级 电容器在承担最优高频分解功率时的充放电瓶颈, 造成跟踪高频指令效果不佳。针对该问题,一种解 决方法是配置更大容量的超级电容器,但相应的成 本费用将大幅增加;而方案 e 因采用了模糊自适应 控制,使得超级电容器每次充放电后的 SOC 值尽可 能维持在合理的水平,提高了下一时刻充放电能力。

5 结论

1)本文建立的多目标优化函数一方面优化了高 渗透率分布式风电下系统的网损和电压指标,另一 方面也对电池储能的运行工况进行的优化,有效减 少了电池储能的等效寿命损耗。

2)将小波包分解层数和频段数作为优化函数的 底层控制变量,实现了运用小波包理论平滑风电输 出的最优分解。

3)采用模糊理论对超级电容器的 SOC 进行自适应控制,有效提高了超级电容器充放电能力,一定程度上减小了超级电容器的配置容量。

4)超级电容器跟踪高频功率的误差,再经多目标优化分配给电网和电池储能,使得各目标函数在最优分解功率修正后能维持在次优的水准。

附录见本刊网络版(http://www.aeps-info. com/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] 梁才浩,段献忠.分布式发电及其对电力系统的影响[J].电力系统自动化,2001,53(5):53-56.

LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its impact on power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 53(5): 53-56.

[2] 雷亚洲.与风电并网相关的课题研究[J].电力系统自动化,2003, 27(8):84-89.

LEI Yazhou. Study on wind farm integration into power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.

[3] 袁小明,程时杰,文劲字.储能技术解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
 YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 14-18.

- [4] 王志群,朱守真,周双喜,等.分布式发电对配电网电压分布的影响[J].电力系统自动化,2004,28(16):56-60.
 WANG Zhiqun, ZHU Shouzhen, ZHOU Shuangxi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electrical Power Systems, 2004, 28(16): 56-60.
- [5] 张勇军,瞿伟芳,林建熙.分布式发电并网的网损影响评价指标研究[J].电力系统保护与控制,2011,39(13):134-137.
 ZHANG Yongjun, QU Weifang, LIN Jianxi. Study on power loss evaluation index of the DG's accessing to the networks [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 134-137.
- [6] 唐巍,薄博,丛鹏伟,等.含分布式发电接入的农村电网多目标规划[J].农业工程学报,2013,29(1):132-137.
 TANG Wei, BO Bo, CONG Pengwei, et al. Multi-objective planning of rural power network incorporating distributed generation [J]. Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 132-137.
- [7] 韩晓娟,陈跃燕,张浩,等.基于小波包分解的混合储能技术在平 抑风电场功率波动中的应用[J].中国电机工程学报,2013, 33(19):8-13.

HAN Xiaojuan, CHEN Yueyan, ZHANG Hao, et al. Application of hybrid energy storage technology based on wavelet packet decomposition in smoothing the fluctuation of wind power[J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(19): 8-13.

- [8] 吴振威,蒋小平,马会萌,等.用于混合储能平抑光伏波动的小波 包-模糊控制[J].中国电机工程学报,2014,34(1):317-324.
 WU Zhenwei, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage system for PV power smoothing[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 317-324.
- [9] 王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储 能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
 WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 1-8.
- [10] 丁明,林根德,陈自年,等.一种适用于混合储能系统的控制策略[J].中国电机工程学报,2012,32(7):1-6.
 DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [11] 丁明,徐宁舟,毕锐.用于平抑可再生能源功率波动的储能电站 的建模评价[J].中国电机工程学报,2011,35(2):66-72.
 DING Ming, XU Ningzhou, BI Rui. Modeling of BESS for smoothing renewable energy output fluctuation [J].
 Proceedings of the CSEE, 2011, 35(2): 66-72.
- [12] 李蓓,郭剑波.平抑风功率的电池储能系统控制策略[J].电网技术,2012,36(8):39-43.
 LI Bei, GUO Jianbo. Control strategy for battery energy storage system to level wind power output[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 39-43.
- [13] DUONG T, ASHWIN M K. Energy management for lifetime extension of energy storage system in micro-grid applications
 [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(3): 1289-1296.
- GONG B, BAO Z P, GUO C C, et al. Select on wavelet in the SK static mixer with the velocity pulse signal analysis [C]// International Conference on Electronic Measurement & Instruments, August 16-19, 2009, Beijing, China: 31-34.
- [15] 谢涛,陈火旺,康立山.多目标优化的演化算法[J].计算机学报, 2003,26(8):997-1002.

XIE Tao, CHEN Huowang, KANG Lishan. Evolutionary algorithms of multi-objective optimization problems [J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(8): 997-1002.

[16] 胡宝清.模糊理论基础[M].武汉:武汉大学出版社,2004: 293-300.

[17] 全国电力监管标准化技术委员会.GBT 19963—2011 风电场 接入电力系统技术规定[S].北京:中国标准出版社,2011.

熊 雄(1988-),男,博士研究生,主要研究方向:电力

系统稳定与控制和规模储能技术。E-mail: 467613113@qq. com

叶 林(1968—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:风力发电与控制技术。E-mail: yelin@ cau.edu.cn

杨仁刚(1953—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究 方向:电力电子技术、微电网技术。

(编辑 钱梦骄 顾晓荣)

Distribution Power System Multi-objective Optimization Based on Wind Power Wavelet Packet Decomposition and Storage System Fuzzy Control

XIONG Xiong, YE Lin, YANG Rengang

(College of Information and Electrical Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China)

Abstract: Wind power scatteringly connected to distribution systems in which load power is balanced locally is generally considered as a compensation method for massively integrating wind power into the backbone of power grid. In order to ensure the low frequency component integrated in system and to determine the medium frequency and high frequency component which are charged and discharged by composite storage, a wavelet packet optimal decomposition method for wind power is proposed. The established multi-objective function includes minimum system loss, minimum system voltage deviation, maximal system voltage flicker margin and minimum battery equivalent life loss. The stage of charge adaptive control of power-type storage using fuzzy control method is applied to improve its ability of charge and discharge, and the fuzzy control output is used to correct the optimal wind power decomposition. In the end, the IEEE 33-bus numerical results are used to verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050203) and National Natural Science Foundation of China (No. 51477174).

Key words: distribution system; wind power generation; distributed connection; composite storage system; wavelet packet decomposition; fuzzy control