

基于变功率因数的分散式风电场优化运行策略

刘 昊, 王 玮, 唐 芬

(北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 提出一种考虑负荷类型和风电机组无功极限的分散式风电场优化运行策略。建立基于静态电压特性的典型负荷通用模型;挖掘分散式风电机组无功能力,采用机端并联电容器平衡并提高双馈感应发电机无功调节能力;分析风电机组功率因数对配电网各节点电压、有功和无功网损影响规律;在此基础上,提出基于改进萤火虫算法的分散式风电场最优功率因数运行方法。基于 IEEE-33 节点模型进行仿真计算,结果表明:分散式风电场小范围功率因数优化调节可有效减小配电网网损,提高电压稳定性。

关键词: 风电场; 无功功率; 功率因数; 负荷模型; 萤火虫算法

中图分类号: O325/TK79 **文献标识码:** A

0 引 言

近年来中国风电正在从集中式开发向集中开发与分散利用并举调整,分散式风电场(dispersed wind farms, DWF)将在未来电网中发挥越来越重要作用。然而,随着高比例 DWF 并入配电网,其高渗透率和双向潮流将对电网的规划和运行产生较大影响。传统配电网中 DWF“接入即忘”的装机政策仅将 DWF 作为大电网的补充。在该背景下,DWF 通常以单位功率因数运行在最大功率点,因此被等效为被动“负”负荷,其功率输出的间歇波动性及高渗透率接入产生的强不确定性,对大电网电压稳定及安全经济运行产生较大影响^[1,2]。中国弃风率近几年虽然有所好转,但仍面临巨大压力,局部地区风电消纳问题突出^[3,4]。

针对以上问题,在减小风电机组并网对配电网电压影响方面,常规集中式风电场均依靠电容器组、SVC、STACOM 等辅助无功调节装置来实现风电场无功管理进而实现接入点电压的稳定^[5,6],但分散式风电布局分散、就地消纳的特点使其无功功率调节特性不同于集中式风电场,采用集中无功补偿装置并非较优方案。分散式风电机组通过自身变流器接入配网可为系统电压稳定提供无功支持,具有灵活的功率调节能力^[7,8]。文献[9]分析了集中式风电场并网的无功协调控制,但该类方法不适用

DWF。文献[10]仅给出风电机组无功极限的模型,但并未将其引入到 DWF 运行控制。

在优化运行方面,集中式风电场由于经过逐级升压和远距离传输,使其和负荷的电气连接较弱。但 DWF 就近接入低压配电网,以满足本地负荷供电为目的。因此,与本地负荷有较强的耦合作用。目前研究主要关注单一恒定负荷类型条件下的配电网典型参数优化方法,但 DWF 在终端负荷附近并网,不同负荷类型对 DWF 并网电压稳定性影响不可忽略^[11]。同时,在优化算法求解方面,与其他智能算法相比,萤火虫算法(firefly algorithm, FA)具有速度更快和变量调节更简单的优势^[12],但同大多数现有智能算法一样,其存在种群过早收敛和收敛速度慢的问题。

在此基础上,本文充分挖掘风电机组本身的无功调节能力并结合接入点附近的负荷类型,以降低网损和提高电压稳定为目的,提出一种基于风电机组功率因数优化的分散式风电场运行控制策略。首先,给出基于典型负荷静态电压特性的通用负荷模型;其次,建立分散式风电场无功调节极限能力模型;基于建立的负荷模型和风电机组无功模型,研究考虑多种负荷类型及随机性风况条件的多目标 DWF 优化运行控制,提出改进萤火虫算法的 DWF 最优功率因数运行方法。最后,利用 IEEE-33 节点配电网模型验证其有效性。

1 通用负荷模型

常规 DWF 通过并网点(point of interconnection, POI)接入配电网。并网点附近负荷类型多种多样,主要可分为恒功率负荷(constant power load, CPL)、工业负荷(industrial load, IL)、商业负荷(commercial load, CL)和居民负荷(residential load, RL),通常同一 POI 点负荷是多种类型组合,本文定义为混合负荷(mixed load, ML)。根据典型负荷的静态电压特性,可得通用负荷模型

$$\begin{cases} P_{Li} = P_{Li}^D \left[a_1 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\alpha_0} + b_1 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\alpha_1} + c_1 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\alpha_2} + d_1 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\alpha_3} \right] \\ Q_{Li} = Q_{Li}^D \left[a_2 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\beta_0} + b_2 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\beta_1} + c_2 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\beta_2} + d_2 \left(\frac{U_i}{U_N} \right)^{\beta_3} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_N ——额定电压, V; U_i ——节点电压, V; P_{Li}^D ——额定电压下负荷有功功率, W; Q_{Li}^D ——额定电压下负荷无功功率, var; P_{Li} ——负荷有功功率, W; Q_{Li} ——负荷无功功率, var。

由式(1)可见,根据负荷静态电压特性,由 4 种典型负荷(CPL、IL、CL、RL)组成的混合负荷可分别用 4 种典型负荷——有功功率权重系数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 , 无功功率权重系数 a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 , 有功功率电压指数系数 α_0 、 α_1 、 α_2 、 α_3 和无功功率电压指数系数 β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_3 来描述^[2]。并且存在 $a_1 + b_1 + c_1 + d_1 = 1$ 和 $a_2 + b_2 + c_2 + d_2 = 1$ 。可见当 $a_1 = 1$ 时,则通用负荷为单一负荷 IL。典型负荷权重系数和指数系数如表 1 所示。显然,对于恒功率负荷 CPL 而言,指数 α_0 和 β_0 是 0。

表 1 典型负荷类型的静态电压特性系数

Table 1 Voltage characteristic coefficients for typical loads

季节	RL		CL		IL	
	α_1	β_1	α_2	β_2	α_3	β_3
春季	1.20	4.38	1.26	3.35	0.18	6
夏季	0.72	2.96	1.26	3.50	0.18	6
秋季	0.98	3.52	0.98	3.95	0.18	6
冬季	1.04	4.18	1.50	3.15	0.18	6

2 分散式风电场的无功支撑能力

双馈式风电机组(doubly-fed induction generator, DFIG)广泛应用于分散式风电场, DFIG 产生功率分别来自定子和转子 2 部分,其无功支撑能力相对复杂,本节着重对此展开研究。

采用基于定子电压的矢量控制,定子侧产生的有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 分别为:

$$\begin{cases} P_s = 1.5 u_{qs} i_{qs} = 1.5 u_s i_{qr} L_m / L_s \\ Q_s = 1.5 u_{ds} i_{ds} = 1.5 u_s i_{dr} L_m / L_s - 1.5 u_s^2 / \omega_s L_s \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{ds} 、 u_{qs} ——定子电压 d 和 q 轴分量, V; i_{dr} 、 i_{qr} ——定子电流 d 和 q 轴分量, A; i_{dr} 、 i_{qr} ——转子电流 d 和 q 轴分量, A; ω_s ——定子气隙磁场旋转角速度, rad/s; L_s ——定子电感, H; L_m ——定、转子间互感, H。

双馈风电机组注入电网的全部有功功率为:

$$P_e = (1-s)P_s \quad (3)$$

式中, s ——转差率。

考虑转子电流定额,定子产生的最大和最小的无功功率 Q_s^{\max} 和 Q_s^{\min} 为:

$$\begin{cases} Q_s^{\max} = -\alpha u_s / \omega_s L_m + \sqrt{(\alpha i_r^{\max})^2 - P_s^2} \\ Q_s^{\min} = -\alpha u_s / \omega_s L_m - \sqrt{(\alpha i_r^{\max})^2 - P_s^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中, i_r^{\max} ——转子电流最大值, A; $\alpha = 1.5 u_s L_m / L_s$ 。

同理,网侧变流器产生的最大和最小的无功功率 Q_g^{\max} 和 Q_g^{\min} 为:

$$\begin{cases} Q_g^{\max} = \sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2} \\ Q_g^{\min} = -Q_g^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中, S_c ——网侧变流器额定视在功率, VA。

结合式(4)和式(5),考虑定、转子侧的无功功率,可得 DFIG 产生的总无功功率最大和最小值 Q_e^{\max} 和 Q_e^{\min} 分别为:

$$\begin{cases} Q_e^{\max} = Q_s^{\max} + Q_g^{\max} \\ Q_e^{\min} = Q_s^{\min} + Q_g^{\min} \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)可见,定子侧无功功率最大和最小值 Q_s^{\max} 和 Q_s^{\min} 不平衡,其最小值决定了无功支撑能力,可通过并网点安装电容器改善无功补偿能力。机端安装 $C = 1/(\omega_s^2 L_s)$ 电容器后,DFIG 和电容器总无功能力 Q_e^{\max} 和 Q_e^{\min} 是平衡的,分别为:

$$\begin{cases} Q_c^{\max} = \sqrt{(\alpha i_r^{\max})^2 - P_s^2} + \sqrt{S_c^2 - (sP_s)^2} \\ Q_c^{\min} = -Q_c^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

图1总结了双馈式风电机组的无功补偿能力。其中,实线表示定子侧产生的无功功率范围;点划线表示定、转子总的无功功率范围;阴影部分表示网侧变流器产生的无功功率范围;虚线表示安装合适电容后总的无功功率范围。可见, $Q_c^{\max} > Q_c^{\max'} > Q_s^{\max'}$ 。并联电容后转子电流 i_r 远小于运行点 (P_0, Q_0) 的转子电流 i_r , 意味着无功补偿能力可通过合理控制风电机组和电容来提升。此外, 由于受转子电流 i_r^{\max} 的约束, 随着有功功率的增加, 无功功率调节能力逐渐下降。

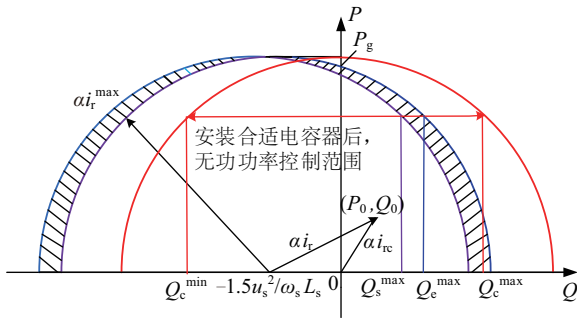


图1 双馈式风电机组的无功补偿能力

Fig. 1 Reactive power capabilities of DFIG

图1说明并网安装合适的电容器后无功调节是平衡的。其功率因数角 φ_{DWF} 运行范围为:

$$\begin{cases} \varphi_{DWF}^{\max} = \arctan(Q_c^{\max}/P_e) \\ \varphi_{DWF}^{\min} = -\arctan(Q_c^{\max}/P_e) \end{cases} \quad (8)$$

3 分散式风电场对网损和电压影响

3.1 网损影响

定义 M 节点配电网接入 DWF 后, 总的有功功率和无功功率网损 P_{LDWF} 和 Q_{LDWF} 为:

$$\begin{cases} P_{LDWF} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left\{ k_{ij} [(P_{Gi} + P_{ei} - P_{Li})P_j + Q_j(Q_{Gi} + \tan(\varphi_{ei})P_{ei} - Q_{Li})] + h_{ij} [(Q_{Gi} + \tan(\varphi_{ei})P_{ei} - Q_{Li})P_j - (P_{Gi} + P_{ei} - P_{Li})Q_j] \right\} \\ Q_{LDWF} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \left\{ \gamma_{ij} [(P_{Gi} + P_{ei} - P_{Li})P_j + Q_j(Q_{Gi} + \tan(\varphi_{ei})P_{ei} - Q_{Li})] + \xi_{ij} [(Q_{Gi} + \tan(\varphi_{ei})P_{ei} - Q_{Li})P_j - (P_{Gi} + P_{ei} - P_{Li})Q_j] \right\} \end{cases} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} k_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_{ij}) & k_{ij} = \frac{r_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_{ij}) \\ \gamma_{ij} = \frac{x_{ij}}{U_i U_j} \cos(\delta_{ij}) & k_{ij} = \frac{x_{ij}}{U_i U_j} \sin(\delta_{ij}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, P_j 、 Q_j ——节点 j 的有功(W)和无功功率(var); P_{ei} ——节点 i 的分散式风场注入的有功功率, W; φ_{ei} ——节点 i 功率因数角; P_{Li} 、 Q_{Li} ——节点 i 的负荷有功(W)与无功(var); P_{Gi} 、 Q_{Gi} ——节点 i 从电网侧注入的有功(W)与无功(var); U_i 、 U_j ——节点 i 和 j 的电压/V; δ_{ij} ——节点 i 和 j 间功角; r_{ij} 、 x_{ij} ——节点 i 和 j 间电阻(Ω)与电抗。

定义有功功率和无功功率网损指数分别为:

$$\begin{aligned} \eta_{APL} &= P_{LDWF}/P_L \\ \eta_{RPL} &= Q_{LDWF}/Q_L \end{aligned} \quad (11)$$

可见, DWF 的有功功率和功率因数对配电网网损有较大影响。图2给出了最大接入的 DWF 功率、功率因数 PF 和配电网网损三者间的影响关系。可见, 当 PF 保持不变时, 随着接入的 DWF 功率的增加, 网损先减小后增加。若接入的 DWF 功率不变, 可见, 随着 PF 增加, 网损先减小后增加。表明配电网网损相对于风电机组注入功率和功率因数的影响关系曲线呈现抛物线特性。随着 DWF 最大注入功率的增加, 由电网输送给负荷的功率逐渐减少, 导致有功功率网损减少。当达到最小有功功率网损点后, 继续增加风电机组功率注入, 将产生逆向潮流, 网损将增加。图2结果表明配电网网损可通过 DWF 功率因数控制而优化。

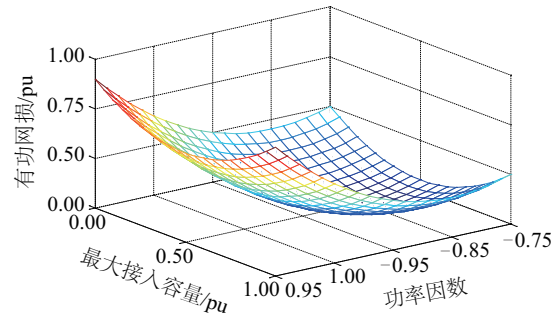


图2 最大功率注入、功率因数和网损影响关系

Fig. 2 Impacts of integrated power and PF on network loss

3.2 电压分布影响

在传统配电网中, 电压分布相对简单, 节点电压随着电气距离的增加而逐渐降低, 因此, 馈线末

端电压可能低于标准要求的最低电压。与传统配电网相比,当 DWF 引入后,考虑到 DWF 功率的随机波动性以及发电源的特性,配电网各节点电压分布将更复杂。图 3 给出了 IEEE-33 节点接入 DWF 后,DWF 运行于 4 种功率因数下节点电压分布图。可见,如果能够调节 DWF 的功率因数或无功功率,可优化电压分布曲线,使节点电压偏差减小。同时可见,针对节点电压分布而言,恒定的单位功率因数并非最优运行方案。

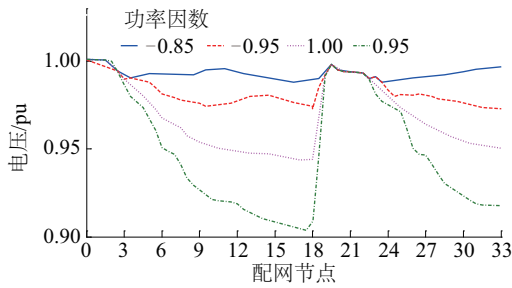


图 3 33 节点 4 种功率因数场景下电压分布

Fig. 3 33-bus network voltage profile in 4 PF scenarios

4 分散式风电场功率因数优化调节

4.1 多目标优化函数

为实现配电网网损和电压分布的综合优化,可通过调节 DWF 的功率因数或无功功率。考虑随机风况条件以及不同负荷类型,建立多目标函数为:

$$MOF = \min(k_1 \eta_{APL} + k_2 \eta_{RPL} + k_3 \delta_v) \quad (12)$$

$$\delta_v = \max_{j=1}^M (U_N - U_j / U_N) \quad (13)$$

式中, δ_v ——电压偏差。

根据目标优先级和重要性,本文设置权重系数 k_1 、 k_2 、 k_3 分别为 0.45、0.40、0.15。

4.2 约束条件

4.2.1 潮流等式约束

$$\begin{cases} P_{Gi} + P_{ei} - P_{Li} - \\ U_i \sum_{j=1}^M U_j \left(\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \cos \delta_{ij} + \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \sin \delta_{ij} \right) = 0 \\ Q_{Gi} + \tan(\varphi_{ei}) P_{ei} - Q_{Li} - \\ U_i \sum_{j=1}^M U_j \left(\frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \sin \delta_{ij} - \frac{x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \cos \delta_{ij} \right) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

4.2.2 分散式风电机组有功和无功功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_k^e \leq P_k^{gmax} \\ |Q_k^e| \leq Q_c^{gmax} \end{cases} \quad (15)$$

式中, P_k^e 和 Q_k^e ——第 k 台风电机组的有功(W)无功功率(var); P_k^{gmax} 、 Q_c^{gmax} ——第 k 台风电机组的最大有功功率(W)和考虑并联电容器、网侧及机侧变流器的最大无功功率输出(var)。

4.2.3 分散式风电场有功、无功功率和功率因数约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DWFi} \leq P_{DWFi}^{max} \\ |Q_{ei}| = |\tan(\varphi_{ei}) P_{ei}| \leq Q_c^{max} \\ \varphi_{DWF}^{min} \leq \varphi_{ei} \leq \varphi_{DWF}^{max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, P_{DWFi}^{max} ——分散式风电场最大功率输出, W, 其为接入点 i 所有运行风电机组的总和。

4.2.4 节点电压不等式约束

$$U_i^{min} \leq U_i \leq U_i^{max} \quad (17)$$

式中, U_i^{min} 、 U_i^{max} ——节点电压下限和上限, V。

4.2.5 支路电流的不等式约束

$$I_i \leq I_i^{max} \quad (18)$$

式中, I_i^{max} ——第 i 条支路电流最高限制, A。

4.2.6 分散式风场的爬坡率限制

$$\Delta P_{DWFi}^{min} \leq P_{ei,t} - P_{ei,t-1} \leq \Delta P_{DWFi}^{max} \quad (19)$$

式中, ΔP_{DWFi}^{min} 、 ΔP_{DWFi}^{max} ——风电机组有功功率爬坡率下限和上限。

4.3 改进型萤火虫优化算法

传统的 FA 算法是模拟自然界中萤火虫发光和趋光的生物学特性发展而来,其概念简单、实用高效,在优化求解函数中具有较强的优势,但其寻优中只与周围萤火虫的亮度有关。

4.3.1 荧光亮度 LI

$$LI = LI_0 \times e^{-\gamma d_{ij}} \quad (20)$$

4.3.2 吸引度 β

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma d_{ij}^2} \quad (21)$$

4.3.3 萤火虫的位置更新公式

$$x_i = x_i + \beta(x_j - x_i) + \alpha(rand - 0.5) \quad (22)$$

式中, LI_0 ——初始状态最大荧光亮度; β_0 ——初始状态吸引度; d_{ij} ——2 个萤火虫 i 和 j 间几何距离; γ ——荧光亮度衰减控制系数; x_i 、 x_j ——萤火虫 i 和 j 的位置; α ——随机运动参数; $rand$ ——0 到 1 之间的随机数。

为了避免种群过早收敛和收敛速度慢问题,改进萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA)在参数设置中引入混沌理论,提高种群的遍历性和多样性。式(19)~式(21)表明参数 α 、 β 和 γ 的设置优化过程中起到关键作用,在可行域内随机改变参数可提升全局搜索能力,利用 Logistic 映射函数对萤火虫种群参数混沌赋值。

$$\gamma(t) = u_1 \gamma(t-1) [1 - \gamma(t-1)] \quad (23)$$

$$\alpha(t) = u_2 \alpha(t-1) [1 - \alpha(t-1)] \quad (24)$$

每次迭代后,按照 Logistic 映射产生一组随机参数重新设置参数,迭代中 3 个参数的范围在 0~1 之间随机选取,采用混沌变量优于盲目和无序的随机搜索,提升改进型萤火虫算法收敛性能。

4.4 改进型萤火虫算法流程

改进型萤火虫算法首先初始化算法位置、亮度等参数。每次迭代过程中计算每个萤火虫的荧光亮度和吸引度,根据混沌控制策略更新萤火虫算法参数,重新计算萤火虫 MOF ,赋值给萤火虫亮度,将更新后的萤火虫亮度 LI 和其他所有萤火虫对比,充分迭代得到亮度最大值,输出全局最优结果。表 2 给出了分散式风电场接入 M 节点配网应用 IFA 优化算法参数取值以及参数对应关系。

表 2 配网接入分散式风电场应用 IFA 的参数对应关系

Table 2 Terminologies and parameter settings of IFA and DN system with integration of DWFs

参数	描述
种群规模	萤火虫数量
N_g	迭代次数阈值
α	随机参数
β_0	初始吸引度
γ	光强吸收因子
萤火虫位置	功率因数(PF)
距离	功率因数差值(ΔPF)
吸引度	ΔPF 指数函数
荧光亮度	MOF
最大荧光亮度	全局最优 MOF

5 算例分析

为对所提方案进行验证,采用 IEEE-33 节点配电网架构进行验证,其中,含 3 个接入点的 IEEE-33

节点系统中有 32 条支路、5 条联络开关支路和 1 个电源网络,首端基准电压 12.66 kV。接入负荷的有功功率和无功功率分别为 3.72 MW 和 2.30 Mvar。考虑 4 种单一负荷类型(RL、IL、CL、CPL)和混合负荷类型,其中,ML 中,IL、RL、CL 分别占比 40%、45%和 15%。仿真中假定利用混合负荷代替传统恒负荷在各节点的接入,且接入容量与传统负荷接入容量一致。基于 DFIG 的分散式风电场接入拓扑如图 4 所示,分别通过 3 个接入点接入 IEEE-33 节点系统。假定各接入点在相同时间段内对应的风速相同,其各接入节点和初始接入容量分别为 1203 kW 接入 14 节点;151 kW 接入 30 节点;964 kW 接入 24 节点。其 IEEE-33 节点系统支路数据和节点数据分别如附录表 1 和表 2 所示。采用某实际风场 2014 年 8 月~2015 年 8 月的全年风资源数据作为仿真和预测分析的数据基础,并用威布尔分布对随机风速进行拟合,选取一天 24 h 的风资源进行测试。图 5 给出了所用负荷的典型有功功率日曲线和风电机组出力曲线。

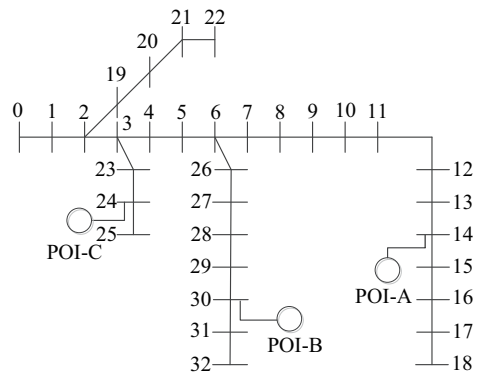


图 4 含 3 个接入点的 IEEE-33 节点系统图

Fig. 4 Diagram of IEEE-33-bus power system containing 3 POIs of DWF

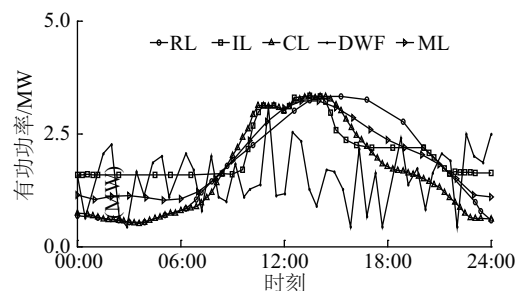


图 5 不同类型负荷的典型有功功率和风电机组出力曲线

Fig. 5 Typical active power of load types and DWF

图 6 给出了 18 时 ML 工况下,人工蜂群算法 (artificial bee colony, ABC)、粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、FA 和 IFA 这 4 种算法的收敛曲线和运算时间。可见,由于 IFA 通过随机数优化参数设置,并引入混沌理论提升多目标函数优化的搜索性能,与 ABC、PSO、FA 这 3 种算法相比,IFA 达到全局最优的迭代次数最少。同时,IFA 简化变量调节,其具有程序资源占有率低和运算时间短的特点。

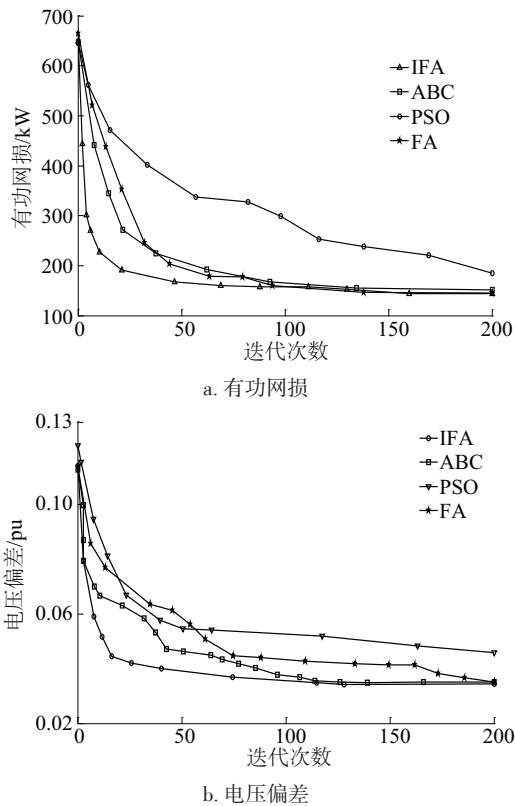


图 6 不同算法的网损和电压偏差收敛曲线

Fig. 6 Convergence curves of network loss and voltage deviation by using different algorithms

图 7 分别给出了工业、商业、居民单一负荷和混合负荷工况下,DWF 采用 4 种恒功率因数控制 (0.95, 1.00, -0.95, -0.85) 及最优 PF 控制下的网损对比结果。由 η_{APL} 和 η_{RPL} 可见,不同负荷类型的结果差异较大。商业负荷 CL 的 η_{APL} 和 η_{RPL} 约为工业负荷 IL 的 5 倍,表明负荷类型需在优化过程中予以考虑。与 4 种恒定功率因数控制 (0.95, 1.00, -0.95, -0.85) 相比,优化 PF 控制分别使 CL 和 ML 的 η_{APL} 有明显改善,RL 和 CL 的 η_{RPL} 有明显改善,表明不同负荷类型优化程度不一,优化 PF 控制在实际应用中需考虑负荷类型。

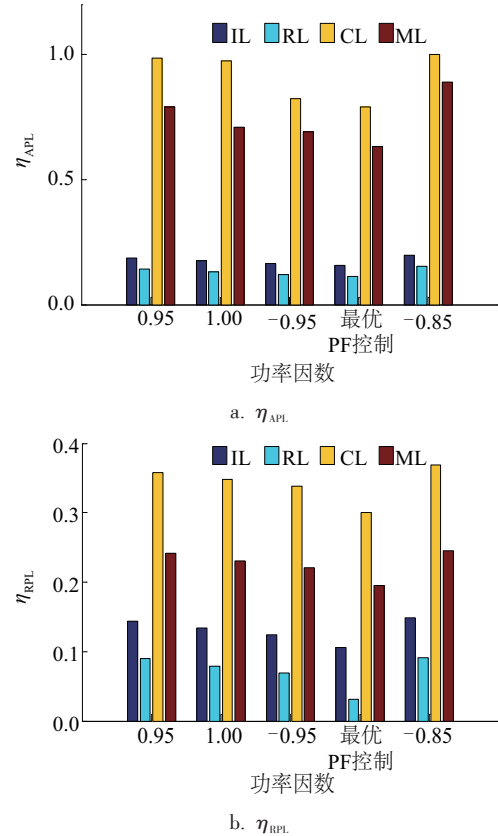
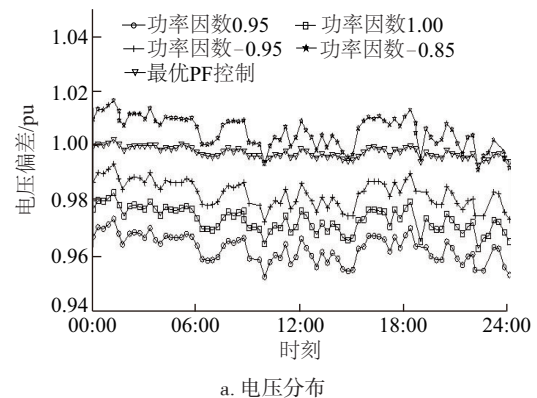


图 7 不同类型负荷下恒 PF 和优化 PF 网损对比

Fig. 7 Network loss under diverse load type conditions by using constant PFs and optimal PF regulation

为进一步验证功率因数优化控制的有效性,图 8 分别给出了混合负荷工况下,DWF 采用 4 种恒功率因数控制 (0.95, 1.00, -0.95, -0.85) 及最优 PF 控制下一天 24 h 的电压变化图。可见,PF 为正时,分散式风电场消耗无功功率,电压偏差恶化。PF 为 -0.95 时,分散式风电机组利用自身并网变流器和电容发出无功,减少从电网来的无功输送,电压曲线有所优化。当 PF 为 -0.85 时,分散式风电场注入过量无功功率,产生逆向潮流,造成配电网电压曲线恶化。



a. 电压分布

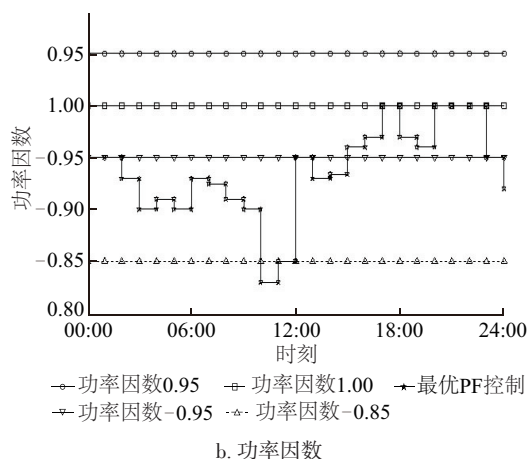


图8 恒PF和优化PF的电压分布和实时优化对比

Fig. 8 Voltage profile and power factor by using constant PFs and optimal PF regulation

实际运行中,负荷实时波动造成无功功率需求实时变化,DWF采用恒功率因数控制并不能满足配电网实时运行需求。由图8可见,通过采用IFA优化方法计算不同时段最优功率因数曲线可见,最优功率因数的调节范围是 $[-0.83, 1.00]$,可见DWF小范围调节功率因数可有效提升系统性能。

6 结 论

不同于集中式风电场,分散式风电场并网点负荷类型多样且布局分散不宜集中无功补偿,针对该问题,本文综合考虑负荷类型和风电机组无功能力,提出一种变功率因数的分散式风电场优化运行策略。并通过算例进行验证,得到以下结论:

1)在网损和电压偏差方面,常规单一负荷与混合负荷差别较大,因此,针对分散式风电场的运行优化有必要考虑本地多样化的负荷类型。

2)引入混沌理论改进萤火虫算法有效解决了原有FA算法的局部收敛和收敛速度慢的问题,在运算时间和收敛速度方面具有明显优势。

3)功率因数对网损和电压偏差的影响分析和算例结果表明,传统DWF恒定单位功率因数运行并非最优方案。小范围的功率因数调节可有效减小配电网网损和电压偏差,提升系统性能。

风电机组自身具有较强的功率调节能力,所提的优化运行策略,采用机端并入电容器,其无功能力

力调节极限更平衡,有利于充分发挥风电机组无功能力,使分散式风电从传统被动运行的执行者,转变为有助于主动配电网经济稳定运行的主动参与者,是传统配电网向主动配电网转变的重要环节。

[参考文献]

- [1] Liu Z, Milanović J V, Probabilistic estimation of voltage unbalance in MV distribution networks with unbalanced load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 693—703.
- [2] 赵 明, 田 德, 邓 英, 等. 风电场无功补偿设备优化控制研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(10): 2628—2635.
- [2] Zhao Ming, Tian De, Deng Ying, et al. optimization control of reactive power compensation equipment in wind farm[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(10): 2628—2635.
- [3] 安 军, 张 师, 穆 钢, 等. 双馈风电场有功分配方式对风火打捆系统暂态稳定性的影响[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1391—1396.
- [3] An Jun, Zhang Shi, Mu Gang, et al. Study of DFIG farm real power dispatching mode influence on transient stability of wind-thermal bundled power system[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1391—1396.
- [4] 王振浩, 葛津铭, 李国庆, 等. 改善风电场群并网点电压稳定的无功协调控制的研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(4): 983—990.
- [4] Wang Zhenhao, Ge Jinming, Li Guoqing, et al. Research of reactive power coordinated control to improve voltage stability in on-grid region of clustered wind farms[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(4): 983—990.
- [5] 李丽霞, 姚兴佳, 王晓东, 等. 双馈风电场新型无功优化分配策略研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1397—1404.
- [5] Li Lixia, Xiao Xingjia, Wang Xiaodong, et al. An optimal reactive power dispatch strategy for interior-point method based wind farms[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2017, 38(5): 1397—1404.
- [6] 卓毅鑫, 林湘宁, 李正天, 等. 基于概率分析的风电场电压跌落评估方法研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38

- (3): 676—683.
- [6] Zhuo Yixin, Lin Xiangning, Li Zhengtian, et al. Wind farm voltage dips risk assessment based on probabilistic methodology[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2017, 38(3): 676—683.
- [7] 陈家俊, 蒋铁铮, 周 勇, 等. 考虑电压骤降的分布式电源定容选址[J]. *电网技术*, 2014, 38(8): 2244—2249.
- [7] Chen Jiajun, Jiang Tiezheng and Zhou Yong, et al. Reasonable allocation of distributed generation in distribution system considering voltage sag[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(8): 2244—2249.
- [8] Guo Wentao, Liu Feng, Si Jennie, et al. Approximate dynamic programming based supplementary reactive power control for DFIG wind farm to enhance power system stability[J]. *Neurocomputing*, 2015, 170: 417—427.
- [9] Kim Jinho, Seok Jul- Ki, Muljadi Eduard, et al. Adaptive Q-V scheme for the voltage control of a DFIG-Based wind power Plant[J]. *Power electronic*, 2016, 31(5): 3586—3599.
- [10] Ghennam T, Aliouane K, Ake F I, et al. Advanced control system of DFIG based wind generators for reactive power production and integration in a wind farm dispatching[J]. *Energy Conversion and Management*, 2015, 105: 240—250.
- [11] 高红均, 刘俊勇, 考虑不同类型 DG 和负荷建模的主动配电网协同规划[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(18): 4911—4922.
- [11] Gao Hongjun, Liu Junyong. Coordinated planning considering different types of DG and load in active distribution network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(18): 4911—4922.
- [12] Othman M M, El-Khattama Walid, Hegazy Y G, et al. Optimal placement and sizing of voltage controlled distributed generators in unbalanced distribution networks using supervised firefly algorithm[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 82(2): 105—113.

OPTIMAL OPERATION STRATEGY FOR DISPERSED WIND FARMS BASED ON VARIABLE POWER FACTOR

Liu Hao, Wang Wei, Tang Fen

(*National Active Distribution Network Technology Research Center of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

Abstract: In this paper, an optimal operation strategy for dispersed wind farms (DWF) is proposed considering load types and reactive power capabilities of wind turbines. The generalized load model based on the static voltage characteristics is introduced. Reactive power capabilities of DWFs are discussed and enhanced, where the reactive power capabilities of doubly-fed induction generator are balanced and improved by installing proper capacitors at the stator. The influences of DWFs with variable power factor on network loss and voltage profile are presented. On this basis, optimal power factor regulation of DWFs based on improved firefly algorithm is proposed. Results in the benchmark IEEE-33 node system indicate that power factor regulation of DWFs in a small range could effectively reduce network loss and enhance voltage stability.

Keywords: wind farm; reactive power; power factor; load model; firefly algorithm

附录 含3个分散式接入点的IEEE-33节点系统参数

附录 表1 IEEE-33节点系统支路数据
Appendix Table 1 Feeder data of IEEE-33-bus system

起点	终点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	起点	终点	电阻/ Ω	电抗/ Ω	起点	终点	电阻/ Ω	电抗/ Ω
0	1	0.0922	0.0470	11	12	1.4680	1.1550	22	23	0.8980	0.7091
1	2	0.0493	0.2511	12	13	0.5416	0.7129	23	24	0.8960	0.7011
2	3	0.3660	0.1864	13	14	0.5910	0.5260	24	25	0.2030	0.1034
3	4	0.3811	0.1941	14	15	0.7463	0.5450	25	26	0.2842	0.1447
4	5	0.8190	0.7070	15	16	1.2890	1.7210	26	27	10.5900	0.9337
5	6	0.1872	0.6188	16	17	0.7320	0.5740	27	28	0.8042	0.7006
6	7	0.7114	0.2351	17	18	0.1640	0.1565	28	29	0.5075	0.2585
7	8	1.0300	0.7400	18	19	1.5042	1.3554	29	30	0.9744	0.9630
8	9	1.0440	0.7400	19	20	0.4095	0.4784	30	31	0.3105	0.3619
9	10	0.1966	0.0650	20	21	0.7089	0.9373	31	32	0.3410	0.5302
10	11	0.3744	0.1238	21	22	0.4512	0.3083				

附录 表2 IEEE-33节点系统节点数据
Appendix Table 2 Node data of IEEE-33-bus system

节点号	有功功率/ kW	无功功率/ kvar	节点号	有功功率/ kW	无功功率/ kvar	节点号	有功功率/ kW	无功功率/ kvar
0	0	0	11	60	35	22	90	50
1	100	60	12	60	35	23	420	200
2	90	40	13	120	80	24	620	200
3	120	80	14	200	10	25	60	25
4	60	30	15	60	20	26	60	25
5	60	20	16	60	20	27	60	20
6	200	100	17	90	40	28	120	70
7	60	100	18	90	40	29	200	600
8	60	20	19	90	40	30	150	70
9	60	20	20	90	40	31	210	100
10	45	3	21	90	40	32	60	40