

9-18-2020

Operation Loss Reduction Control for Large-scale Wind Farm Based on Hybrid Modeling Simulation

Yunqi Xiao

Department of control and computer engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Wang Yi

Department of control and computer engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Operation Loss Reduction Control for Large-scale Wind Farm Based on Hybrid Modeling Simulation

Abstract

Abstract: Due to the large number of transformers and collection lines in large-scale wind farms, the losses of collecting system is serious in actual operation. *A reactive power/voltage control strategy is proposed, which takes wind turbines as the distributed reactive power sources to optimize the power flow in wind farm and reduce the overall losses of collector system.* To improve the efficiency of wind farm modeling and multi-scene loss reduction simulation, *a hybrid modeling and simulation scheme based on combining object model configuration and control algorithm programming is proposed. The wind farm model consists of module configuration, and can be called by the engine file formed by the control algorithm to implement the simulation optimization.* The effectiveness of the proposed optimal control strategy and the hybrid simulation modeling method are verified by a study on the loss reduction control of a 125 MW large wind farm.

Keywords

wind farm, energy-saving, reactive power control, genetic algorithm, particle swarm optimization

Recommended Citation

Xiao Yunqi, Wang Yi. Operation Loss Reduction Control for Large-scale Wind Farm Based on Hybrid Modeling Simulation[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32(9): 1831-1838.

基于混合建模仿真的大型风电场降损控制

肖运启, 王乙

(华北电力大学, 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要: 由于大型风电场变压设备多、集电线路长, 在实际运行中集电系统损耗突出, 对此提出一种利用风电机组作为分布式无功源, 以优化风电场内潮流、降低集电系统总体损耗的无功/电压控制策略。同时, 为提升风电场建模以及多场景降损优化仿真的效率, 设计了一种基于对象模型组态与控制算法编程相结合的混合建模仿真方案, 风电场模型采用模块组态建模, 并由控制算法形成的引擎文件自主调用实施仿真优化。通过对某 125 MW 大型风电场进行降损控制的算例研究, 验证了所提控制方案的有效性和混合仿真建模方法的高效性。

关键词: 风电场; 运行节能; 无功控制; 遗传算法; 粒子群算法

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2020) 09-1831-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0128

Operation Loss Reduction Control for Large-scale Wind Farm Based on Hybrid Modeling Simulation

Xiao Yunqi, Wang Yi

(Department of control and computer engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Due to the large number of transformers and collection lines in large-scale wind farms, the losses of collecting system is serious in actual operation. A reactive power/voltage control strategy is proposed, which takes wind turbines as the distributed reactive power sources to optimize the power flow in wind farm and reduce the overall losses of collector system. To improve the efficiency of wind farm modeling and multi-scene loss reduction simulation, a hybrid modeling and simulation scheme based on combining object model configuration and control algorithm programming is proposed. The wind farm model consists of module configuration, and can be called by the engine file formed by the control algorithm to implement the simulation optimization. The effectiveness of the proposed optimal control strategy and the hybrid simulation modeling method are verified by a study on the loss reduction control of a 125 MW large wind farm.

Keywords: wind farm; energy-saving; reactive power control; genetic algorithm; particle swarm optimization

引言

随着我国新能源发电比例的大幅提高, “风火



收稿日期: 2019-03-27 修回日期: 2019-08-15;
基金项目: 国家自然科学基金(51677067), 中央高校
基本科研业务费专项资金(2018MS27);
作者简介: 肖运启(1980-), 男, 河北邯郸, 博士, 副
教授, 研究方向为风力发电系统建模与优化控制。

同价”、“平价上网”成为风电运营的大势所趋, 这就要求风电场向精细运行、节能降耗转型。与火电厂相比, 风电场具有发电单元众多、集电线路长等特点, 由全国近百个随机风电场 2014 年全年场损率统计数据, 得出其平均风电场场损率为 3.93%, 而河北承德风电场场损率达到 7.34%, 白土岗风电场场损率达到 6.84%, 发电损耗问题十分突出^[1]。

<http://www.china-simulation.com>

• 1831 •

相较于风力机传动链机械损耗、电力电子变流装置开关损耗、发电机损耗等由机组性能决定、可调裕度有限的因素,由集电系统所产生的电气损耗则受风电场的潮流分布影响显著^[2],具有较大的优化空间。而且,目前主流双馈型或直驱型风电机组,其所配备的变流器系统都具备良好的无功控制能力,可实现机组功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 之间连续运行^[3],相当于在风电场集电线上分布着多个灵活可控的无功补偿装置,这为通过风电机组的无功优化控制来提高风电场接入电网的稳定性和安全性提供了支撑条件。例如文献[4]设计了一种风电场无功协调控制策略,提高了风电场无功裕度及并网点电压稳定性。文献[5]提出了一种利用集电系统拓扑结构特点来改善并网点及机端电压水平的控制策略。

而通过优化风电场无功控制,降低集电线路损耗,则是进一步提高风电场运行经济性的重要措施,也是本文关注的重点。但是,由于风电机组无功电压状态与集电线路的耦合关系复杂,研究降损控制方案首先需要对风电场建立精确电气仿真模型,以保证实际实施效果。例如文献[6]用电网节点电压偏微分方程建模,有利于下一步优化算法的集成与调试,但是编程过程复杂,开发效率低;文献[7-8]基于电气设备模块组态软件平台直接建模,便于模型拓扑调整及参数修改,但是在组态平台中难以实现复杂优化算法,不利于算法升级。因此,优化控制算法与风电场模型之间的交互策略,对提升多场景优化仿真应用的建模开发和测试效率,具有重要意义。

为此,本文针对大型风电场集电系统降损优化控制问题,设计了一种基于对象模型组态与控制算法编程相结合的混合建模仿真研究方案。首先基于 Matlab/Simulink 平台搭建了目标风电场的组态仿真模型;然后提出了一种以集电线路损耗为目标,以风电机组机端及并网点电压为约束,以遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)为求解策略的优化方案,并开发了的.mat 文本形式的优化引擎控制程序;最后在混合仿真的架构下,利用优化引擎自动驱动组

态模型进行多场景控制参数的寻优仿真,对本文所提方法进行了验证。

1 仿真模型组态

以某 125 MW 大型海上风电场为研究对象,其中包含 5 MW 双馈型风电机组 25 台,风电场拓扑结构如图 1 所示。各风电机组间距为 0.56 km,集电系统电缆选取 10kV ABB XLPE 铜电缆,截面积为 240 mm²,均电阻为 0.072 9 Ω/km,均电容为 0.24 μF/km,均电感为 0.38 mH/km。

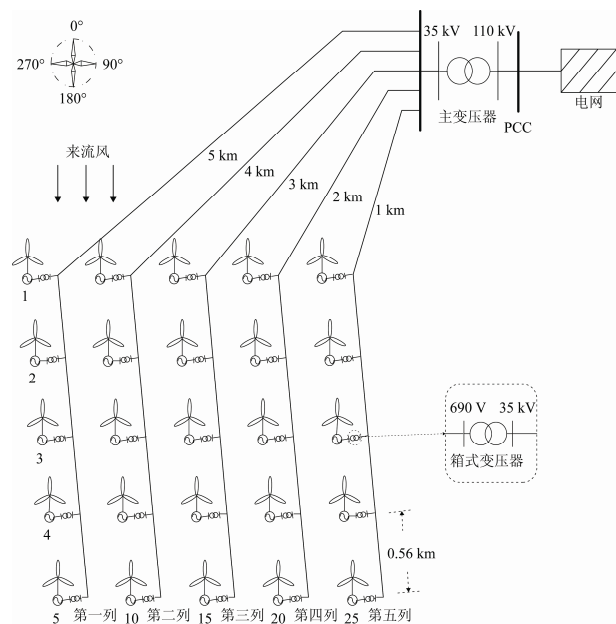


图 1 风电场拓扑结构
Fig. 1 Topology of wind farm

根据风电场拓扑结构及集电系统电缆参数,基于 Simulink/Simpowersystem 库中所提供的包括风电机组、线路及各类电气设备模型,将各模块进行组态连接及参数设置,建立了风电场系统模型,示意图如图 2 所示。

此模型为风电场降损控制提供了仿真研究对象。而且建模过程通过模块组态完成,结构直观且易于修改。但是,该模型只能支持风电机组在固定无功设定值工况下的系统仿真研究,对于多工况参数优化还需要依赖手工设定操作,效率较低。因此需要通过开发优化引擎的方式,实现自动调用仿真模型进行寻优。

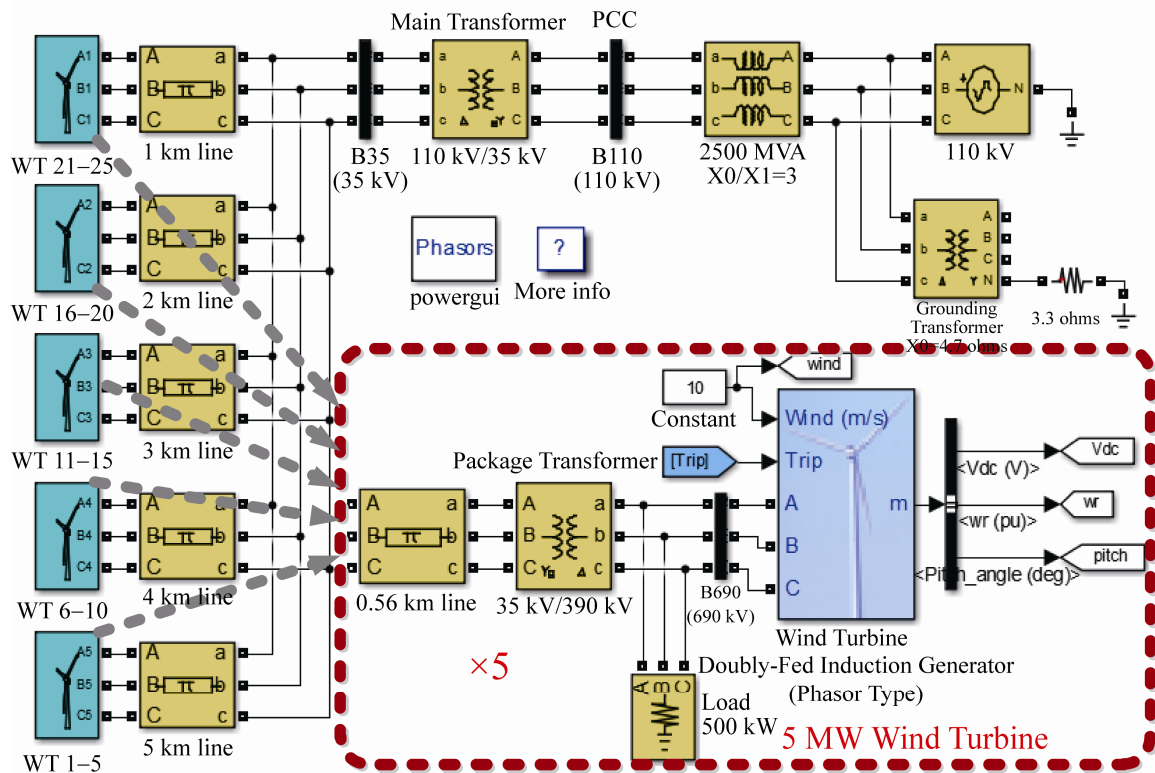


图 2 风电场组态模型

Fig. 2 WF model in Simulink platform

2 优化控制模型

2.1 优化模型

本文所提出的优化模型以风电场集电系统损耗最少为目标函数, 包括传输线路、机组箱变和风电场主变。因此, 集电系统损耗表示为:

$$P^{\text{loss}} = \sum_{i=0}^N P_{\text{tri}}^{\text{loss}} + \sum_{k=1}^N P_{\text{cak}}^{\text{loss}} \quad (1)$$

式中: P^{loss} 为集电系统整体损耗; $P_{\text{tri}}^{\text{loss}}$ 为变压器损耗, 包括箱变与主变; $P_{\text{cak}}^{\text{loss}}$ 为场内各条集电线路损耗。

建立优化目标函数 f :

$$f = \min P^{\text{loss}} = \min \sum_{i=1}^N P_{\text{WT}i} - P_{\text{PCC}} \quad (2)$$

式中: $P_{\text{WT}i}$ 为各风电机组节点有功功率测量值; P_{PCC} 为并网点有功功率测量值。

在进行风电场无功优化时, 不仅需要满足潮流等式约束, 还需要满足风电机组无功输出、节点电压以及线路视在功率的不等式约束, 设计如下:

$$Q_{\text{WT}i}^{\min} \leq Q_{\text{WT}i} \leq Q_{\text{WT}i}^{\max} \quad (3)$$

$$V_j^{\min} \leq V_j \leq V_j^{\max} \quad (4)$$

$$S_l \leq S_l^{\max} \quad (5)$$

此外, 并网点的无功需求要跟随电网设定:

$$Q_{\text{PCC}}^{\text{ref}} - Q_{\text{PCC}}^{\text{meas}} = 0 \quad (6)$$

式中: $Q_{\text{WT}i}$ 为第 i 台风电机组发出的无功; V_j 为第 j 个节点电压; S_l 为集电线路 l 上的视在功率; $Q_{\text{PCC}}^{\text{ref}}$ 和 $Q_{\text{PCC}}^{\text{meas}}$ 分别是并网点处无功参考值和实测值。

2.2 求解算法

本文所建立的风电场无功优化调度数学模型, 是一个典型的非线性多目标优化问题。传统的优化方法如线性规划^[9]、内点法^[10]以及顺序二次规划^[11]等在解决此类问题时, 常会出现初始值敏感、收敛到局部最优、目标函数微分困难等情况。随机优化算法也是解决此类问题的常用技术路线, 但针对具体优化问题, 不同算法在收敛速度和全局优化性能上存在一定差异, 为此本文分别设计了基于 GA 和

PSO 的求解策略进行对比验证,以期提供更符合工程实际需要的优化算法引擎。

本文在 GA 算法的设计应用中,选用了浮点数与整数结合编码代替二进制字符串编码,提高了遗传算法的计算能力,减少了对内存的占用;并根据最优个体精英保留策略,选取了适当数量的优秀个体进行保护。在 PSO 算法的设计应用中,选择惯性权重粒子群算法对优化模型进行求解,其参数主要有惯性权重,加速因子 C_1 和 C_2 ;本文中 C_1 和 C_2 的取值为 2,惯性权重采用了线性衰减策略。

2.3 约束条件处理

对约束条件的处理是优化问题的关键,处理的效果会直接影响到优化的质量。由于 GA 和 PSO 这两种算法都使用适应度函数,因此可以采用相同的约束条件处理方法。本文设计了如下的惩罚函数来处理约束条件,以满足各风电机组节点及并网点无功和电压要求,其中不等式约束处理为:

$$f_1 = w_1 \sum_{i=1}^N f(v_i) + w_2 \sum_{j=1}^N f(u_j) \quad (7)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x_{\min} < x < x_{\max} \\ (x - x_{\max})^2, & x > x_{\max} \\ (x - x_{\min})^2, & x < x_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

为加快搜索速度,将式(6)的等式约束转化为不等式约束:

$$\left| Q_{PCC}^{\text{ref}} - Q_{PCC}^{\text{meas}} \right| < \varepsilon \quad (9)$$

$$f_2 = w_3 f(Q_{PCC}^{\text{meas}}) \quad (10)$$

整体惩罚函数如下:

$$F_{\text{penalty}} = f_1 + f_2 = w_1 \sum_{i=1}^N f(v_i) + w_2 \sum_{j=1}^N f(u_j) + w_3 f(Q_{PCC}^{\text{meas}}) \quad (11)$$

式中: v 为所有风电机组无功设置的控制变量; u 为因变量,包括所有节点电压和并网点无功需求; w_1 , w_2 和 w_3 为惩罚因子,影响优化效果,对初始值影响较小。

通过式(7)~(11)将约束条件转化为惩罚函数,确保不同工况下优化后的工作状态均满足要求,避

免了传统方法在多工况变换时节点电压及无功越限的情况。

2.4 对组态模型的修改

根据上述优化控制模型中所设计的优化变量,我们对图 2 中的组态模型进行修改。将原各相关功能模块中仅支持一次仿真的固定参数,以变量形式来设定。这样一来,就可以利用优化算法文件在外部直接与图 2 模型进行通讯,在线设定或修改仿真模型参数,以及初始工况参数,为自动优化仿真提供支撑条件。图 2 模型中所需修改的主要参数如表 1 所示。

表 1 图 2 模型中主要接口变量
Tab. 1 Interface variables of Model in Fig. 2

变量类型	变量名	解释	变量数
模型变量	Q_{WTi}	机组模块无功设定值	25
	Q_{PCC}^{ref}	并网点无功需求	1
优化过程变量	Q_{WTi}	机端无功	25
	Q_{PCC}^{meas}	并网点无功	1
	V_{WTi}	机端电压	25
	V_{PCC}	并网点电压	1
	p^{loss}	集电系统损耗	1
初始状态变量	Q'_{WTi}	初始机端无功	25
	Q'_{PCC}	初始并网点无功	1
	V'_{WTi}	初始机端电压	25
	V'_{PCC}	初始并网点电压	1
	$p^{\text{loss}'}$	初始集电系统损耗	1

3 混合仿真架构

基于 Matlab 环境开发优化引擎代码,建立 .mat 文件。其中,包括实现上节中所设计的优化算法,以及与 Simulink 模型进行交互的调用引擎,引擎通过 "sim" 命令驱动风电场 Simulink 模型 (.slx 文件) 进行仿真,以及与优化算法进行数据交换。

引擎文件主框架采用自动循环结构,工作流程如图 3 所示。

运行优化引擎 .mat 文件,根据每次调用模型的仿真结果,计算目标函数值并进行下一步优化,即自动循环调用 "sim" 命令启动风电场 Simulink 模型进行仿真,优化次数达到或满足其他中断条件后,

停止流程并将最终优化后的各参数稳态值导入工作空间。

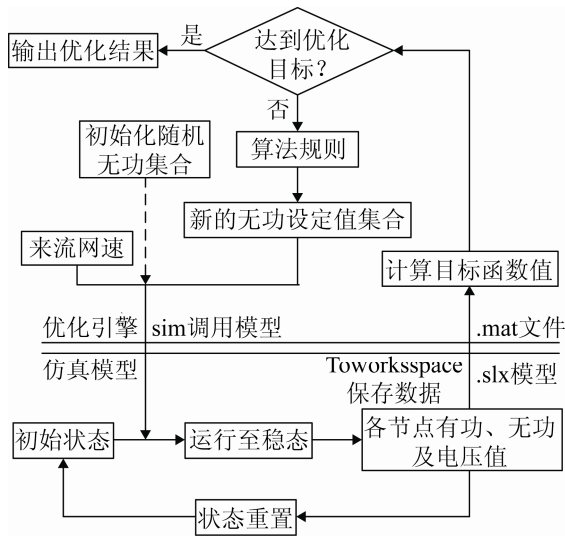


图 3 混合仿真流程图

Fig. 3 Flow chart of hybrid simulating

其循环调用仿真主要核心伪代码如下:

```
load xInital%读取初始状态
Qref=Qref0;%初始化算法种群
while (%算法收敛条件%)
do
sim('power_wind_dfig');%调用组态模型
xIntermediate=Q;V;Ploss;%读取无功、电压及网损数据
f=f(xIntermediate);%计算目标函数
%算法优化过程%
Qref=Qrefn;%下一代无功设定值
end
xInitial=xFinal;
save xInitial%保存初始状态
```

这种仿真方案可以避免多次人工操作, 有效提高了多场景多参数优化仿真问题的研究效率, 适合于本文风电场降损控制优化问题的研究。

4 算例应用

4.1 主场景仿真

首先基于上述仿真系统, 对该风电场主导风

况场景进行仿真研究。所在地区风电机组运行区间的风频分布如图 4 所示, 10 m/s 风况为该地区主导风频。

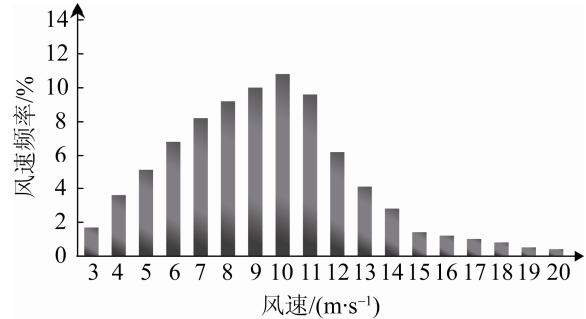


图 4 风速频率分布

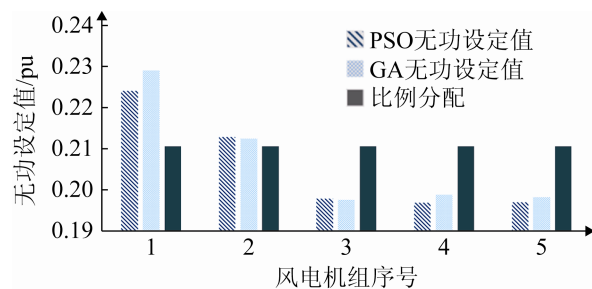
Fig. 4 Wind velocity frequency distribution

算例中并网点无功需求为 0.2 pu, 传统的风电场无功控制为按比例分配, 即将风电场总的无功需求按照风电机组的无功容量均匀分配, 如式 (12)所示。

$$Q_{WTi}^{ref} = \frac{Q_{WTi}^a}{\sum_{i=1}^n Q_{WTi}^a} Q_{Total}^{ref} \quad (12)$$

式中: Q_{Total}^{ref} 为风电场总的无功需求; Q_{WTi}^{ref} 为风电机组 i 的无功指令; Q_{WTi}^a 为风电机组 i 的无功容量。

运行优化引擎文件, 得到基于 GA、PSO 以及比例分配方法的仿真优化结果, 各风电机组的无功设定值, 如图 5 所示。假设风电场内风速分布基本一致, 采用比例分配法时的各风电机组无功设定值都是相同的; 而采用 GA 和 PSO 优化后的风电机组无功设定值在每条集电线路上基本呈递减趋势。这是由于在风电场中, 若风电机组越靠近并网点, 则线路长度越短, 阻抗越小, 更适宜承担无功出力。



(a) 序号 1~5

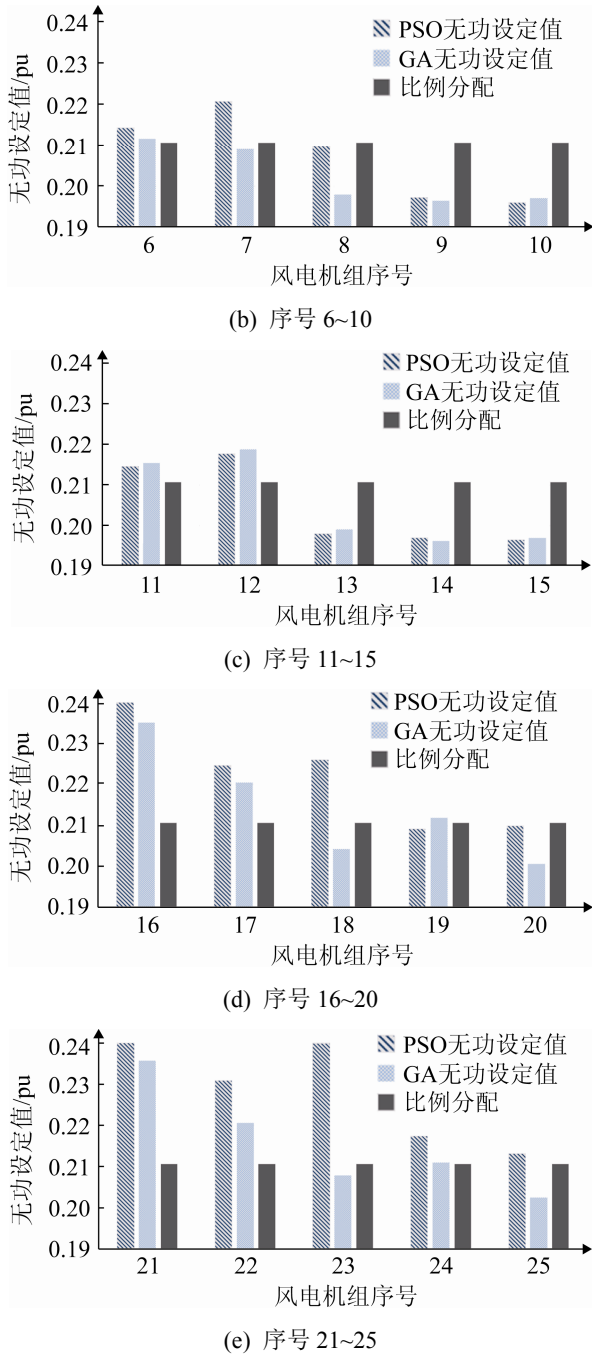


图5 风电场无功设定值分布

Fig. 5 Reactive power reference distribution in WF

采集风电场模型中集电系统各构成部分的损耗,如表2和图6所示,用以比较各控制方法的性能。结果表明采用本文的无功优化控制可以明显降低集电系统的有功损耗,其主要降损作用在于集电线路和箱式变压器,主变压器受到影响较小;而在该场景中GA和PSO在优化结果上并无明显区别,

都收敛到相同的解,说明了优化结果的稳定性。GA和PSO的收敛曲线如图6所示,2种算法都收敛到同一解,显示出了优化结果的一致性;其各自解空间变化如图7所示,表明在此工况条件下,GA在稳定性上略高于PSO。

表2 集电系统损耗

控制策略	比例分配	无功优化控制	
		PSO优化	GA优化
主变压器	800.94	799.86	799.86
箱变+集电线路	904.17	832.07	832.06
总计	1 705.11	1 631.93	1 631.92

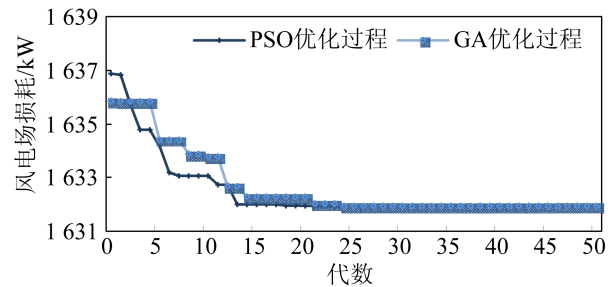
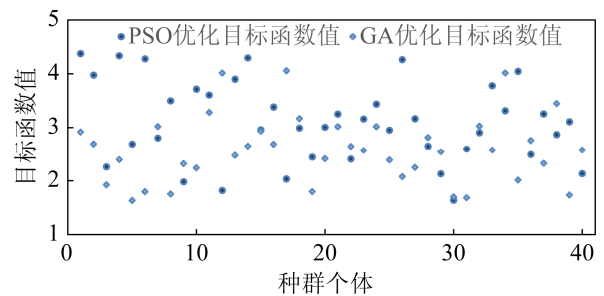
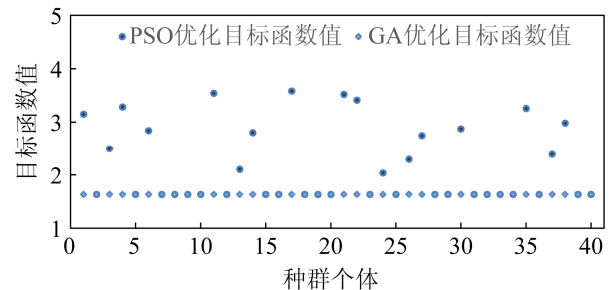


图6 算法收敛过程

Fig. 6 Algorithm convergence process



(a) GA和PSO初始解空间



(b) GA和PSO最终解空间

图7 算法解空间变化

Fig. 7 Solution space changes of algorithmic

4.2 多场景仿真

当来流风速为 10 m/s, 并网点无功设定值 Q_{pcc}^{ref} 由 -0.2~0.2 变化时, 运行优化引擎得到不同无功控制策略下的集电系统整体损耗如图 8 所示。可以看出, 采用 GA 与 PSO 优化控制的降损效果均明显优于比例分配法。

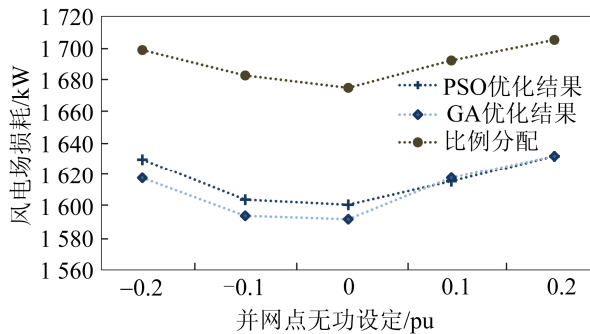


图 8 损耗随并网点无功设定的变化

Fig. 8 Losses with reactive power demand of PCC

4.3 风电场年损耗量计算

由于风电场集电系统损耗会随着工况变化而改变, 因此通过图 4 所示风频数据对不同无功控制策略下风电场年损耗状况进行估算, 以期总体评估控制策略的改进效果。这体现了本文设计的仿真架构的优越性, 将各工况条件在引擎文件中进行编程实现, 自动调用风电场 Simulink 模型进行多次仿真, 极大提高了工作效率。表 3 列出了在不同并网点无功设定及风速, 共计 50 组工况下, 采用比例分配及分别由 GA 和 PSO 优化的无功控制策略的年损耗量计算数据。可见, 所提出的降损优化方案在降低风电场损耗方面明显优于传统控制方法。

表 3 风电场全年损耗量

Tab. 3 Total losses of WF throughout a year

Q_{pcc}^{ref}/pu	比例分配/GWh	PSO 优化/GWh	GA 优化/GWh
-0.2	9.51	8.99	8.92
-0.1	9.36	8.86	8.83
0.0	9.36	8.87	8.85
0.1	9.51	9.00	8.98
0.2	9.72	9.18	9.16

5 结论

(1) 针对大型风电场实际运行中集电系统损耗突出的问题, 提出了一种风电场新型无功控制策略。建立风电场集电系统损耗模优化数学模型, 将风电场无功/电压控制与集电系统降损控制相结合, 算例仿真验证了所提优化算法的有效性。

(2) 针对风电场控制优化问题对建模精度和仿真效率的需要, 设计了混合建模方案, 其中风电场模型采用 Simulink 模块组态建模, 优化控制系统模型采用文本编程形成引擎文件, 由引擎文件自主调用组态模型实施仿真优化。这种建模方式既简化了建模过程, 又提高了算例验证的工作效率, 尤其适合于复杂系统多工况仿真研究应用。

参考文献:

- [1] 韩明, 朱志成, 包大恩. 风电场综合厂用电率统计分析[J]. 风力发电, 2015(4): 36-39.
Han Ming, Zhu Zhicheng, Bao Daen. Statistical Analysis of Wind Farm Integrated Auxiliary Rate[J]. Wind Power, 2015(4): 36-39.
- [2] Jung S, Jang G. A Loss Minimization Method on a Reactive Power Supply Process for Wind Farm[J]. IEEE Transactions on Power Systems (S0085-8950), 2017, 32(4): 3060-3068.
- [3] 刘其辉, 赵亚男, 毛未. 分散式风电 AVC 策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 201-207.
Liu Qihui, Zhao Yanan, Mao Wei. AVC Strategy for Distributed Wind-power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 201-207.
- [4] 丁明, 张宏艳, 韩平平, 等. 考虑机组同调性的风电场无功协调控制[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3390-3395.
Ding Ming, Zhang Hongyan, Han Pingping, et al. A Coordinated Reactive Power Control Strategy for Wind Farm Considering Coherence of Generating Units[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3390-3395.
- [5] 严干贵, 孙兆键, 穆钢, 等. 面向集电系统电压调节的风电场无功电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 140-146.
Yan Ganggui, Sun Zhaojian, Mu Gang, et al. Collector System Voltage Regulation Oriented Reactive Power Control Strategy for Wind Farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 140-146.
- [6] 郭鹏, 刘文颖, 但扬清, 等. 大规模风电接入电网的无

- 功协调降损方法[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 190-199.
- Guo Peng, Liu Wenying, Dan Yangqing, et al. Reactive Power Coordinated Control to Reduce Grid Loss with Large-scale Wind Power Integration[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 190-199.
- [7] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 不对称故障下直驱风机网侧改进控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1131-1139, 1149.
- Wang Dan, Liu Chongru, Li Gengyin. Simulation Study of Grid-side Improved Control Strategy for Direct-driven Wind Turbine Under Unbalanced Faults[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1131-1139, 1149.
- [8] 刘力卿, 米增强, 杜平, 等. 用于黑启动暂态分析的 DFIG 空载并网仿真[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(7): 1575-1585.
- Liu Liqing, Mi Zengqiang, Du Ping, et al. DFIG Grid Connection Simulation Method Used for Transient Analysis of Black-start[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(7): 1575-1585.
- [9] Hamidi A, Golshannavaz S, Nazarpour D. D-FACTS Cooperation in Renewable Integrated Microgrids: A Linear Multi-Objective Approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy(S1949-3029), 2019, 10(1): 355-363.
- [10] Zhang B, Hou P, Hu W, et al. A Reactive Power Dispatch Strategy With Loss Minimization for a DFIG-Based Wind Farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy (S1949-3029), 2016, 7(3): 914-923.
- [11] Meegahapola L, Durairaj S, Flynn D, et al. Coordinated Utilisation of Wind Farm Reactive Power Capability for System Loss Pptimisation[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems (S1430-144X), 2011, 21(1): 40-51.