

面向电力市场的含风电机组配电网 无功优化模型及其求解算法

周冬旭, 李晓明

(武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 从电力市场角度出发, 在研究变速恒频双馈异步风电机组(DFIG)功率特性的基础上, 按照无功功率流向的不同以及无功功率与有功功率的关系, 将 DFIG 输出功率分为 3 个运行区域, 并给出各个区域内无功功率费用计算函数。建立以有功网损、无功功率费用及电压越限最小为目标函数的无功优化模型, 采用基于自适应步长的细菌觅食优化-粒子群优化混合智能算法进行求解, 避免了标准细菌觅食算法易陷入局部最优解的缺点, 进一步提高了优化前期的全局搜索能力和优化后期的局部搜索能力。仿真算例表明, 所提方法有效降低了系统网损, 并充分调动风电场参与电网无功电压调节。

关键词: 风电; 双馈风电机组; 混合智能算法; 无功; 优化; 模型

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.005

0 引言

目前, 风力发电作为世界各国优先发展的新能源发电技术, 已经在节能减排、缓解能源紧张局面以及边远地区供电等多方面发挥了重要的作用。但是由于风能的间歇性, 风电机组输出波动的随机性功率, 使得高渗透率下风电场的接入给电网造成了一系列新的问题, 如果处理不当, 将会威胁电网的稳定运行^[1-2]。

近年来, 风电技术不断成熟, 变速恒频机组(变速恒频双馈异步风电机组 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)和直驱永磁风电机组)逐渐成为了风电场的主流机型^[3], 其中 DFIG 由于成本相对较低、无功调节迅速、能够有效地维持接入电网的电压稳定性而成为风电场建设的首选机型。本文以 DFIG 为主要研究对象, 分析其并网后的无功优化问题。

国内外学者针对传统电网的无功优化问题已经进行了大量的研究^[4-5]。传统电网的无功优化通过调节发电机端电压、调整有载调压变压器分接头位置、改变无功补偿装置投切容量等措施, 达到优化电网的无功潮流分布、降低有功损耗的目的。随着风力发电技术的兴起, 风电机组接入配电网的无功优化问题受到了越来越多的关注。考虑风速具有统计特征, 文献^[6-7]提出了基于概率的场景决策法来解决含风电机组的配电网无功优化问题, 并且不受接入风电机组数量的限制。文献^[8]提出了基于聚类和竞争克隆机制的多智能体免疫算法求解无功优化模型, 取得了较好的效果。文献^[9]考虑了并网 DFIG 的无功调节能力, 将无功容量极限作为约束条件进行求解, 并分析了风速预测误差对风机无功容量的影响。

随着电力市场的逐步完善以及风电渗透率的不断提高, 如何将 DFIG 作为可调无功源参与接入电网的电压无功调节, 共同维持接入电网的安全稳定运行成为了一个新的研究方向。由于我国电力系统实行厂网分离改革, 风电机组属于不同的开发商所有。开发商基于自身利益的衡量, 一般不愿意让所属风电场发出无功功率而影响有功功率的输出。因此, 含风电机组的无功优化问题, 需要在保证电网稳定运行的前提下, 兼顾电力公司和开发商的利益, 以提高电网整体的安全性和经济性。本文在深入研究《风电场接入电力系统技术规定》^[10](以下简称《技术规定》)及电力市场条件下无功优化问题的基础上, 提出了基于 DFIG 无功功率运行分区的定价原则, 应用于含风电机组的配电网无功优化问题。同时考虑无功优化问题呈现多目标、多维度、多约束等特点, 本文采用粒子群优化 PSO(Particle Swarm Optimization)算法、细菌觅食优化 BFO(Bacteria Foraging Optimization)算法的智能混合算法, 并引入自适应变步长思想, 对所提出的模型进行求解。最后以改进的 IEEE 33 节点系统为算例, 验证了本文所提方法的可行性和有效性。

1 变速恒频 DFIG 功率特性分析

为了建立含 DFIG 的配电网无功优化模型, 首先需要研究 DFIG 的功率特性。风电机组有功出力受风速影响较大, 目前广泛采用分段函数表示, 即第 i 时段风电机组有功出力可用其期望值来替代。风电机组输出无功功率 Q_g 由定子侧无功功率 Q_s 与网侧变换器无功功率 Q_c 之差构成, 并受多种因素制约。

DFIG 功率模型如图 1 所示。

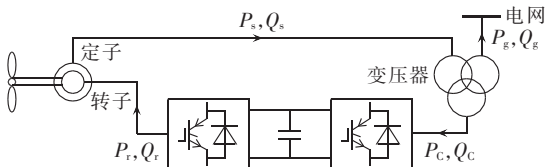


图 1 DFIG 功率模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of DFIG power model

1.1 变速恒频 DFIG 有功功率特性

忽略定、转子机械损耗,DFIG 的有功功率平衡方程为:

$$P_m = P_g = P_s + P_r \quad (1)$$

$$P_s = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (2)$$

$$P_r = u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq} \quad (3)$$

其中, P_m 为风电机输入机械功率; u_{sd} 、 u_{sq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为电压、电流的 d 、 q 轴分量。

根据输出功率按照转差率在定、转子间的分配关系^[11]有:

$$P_s = P_g / (1-s) \quad (4)$$

$$P_r = -s P_g / (1-s) \quad (5)$$

其中, s 为转差率。

由式(1)~(5)可知,DFIG 输出到电网的有功功率为定、转子侧有功功率之和,并且按照转差率的不同进行分配,有功功率运行范围受定子侧最大电流限制。

1.2 变速恒频 DFIG 无功功率特性

DFIG 输出无功功率为定子侧、网侧变换器发出或吸收无功功率之和。但是由于变换器通常采用 PWM 控制,功率因数接近于 1,并且变换器传输有功功率较小,消耗无功功率可以忽略不计,因此 DFIG 输出到电网的无功功率为:

$$Q_g = Q_s \quad (6)$$

$$Q_s = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq} \quad (7)$$

将以上各式变换到等幅值的 3/2 坐标系下,并将同步旋转坐标系的 d 轴与定子合成磁链矢量相重合,有 $\psi_{sd} = \psi_s$, $\psi_{sq} = 0$,同时忽略定子侧绕组电阻,则可得 DFIG 定子侧功率关系为^[11]:

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_1} \right)^2 = \left(\frac{3X_m}{2X_1} U_s I_r \right)^2 \leq \left(\frac{3X_m}{2X_1} U_s I_{rmax} \right)^2 \quad (8)$$

其中, U_s 为定子侧电压; X_1 为定子侧漏感与励磁电感之和; I_{rmax} 为转子侧最大电流。

将式(4)、(6)代入式(8),则有 DFIG 输出有功功率与无功功率的关系式如下:

$$\left(\frac{P_g}{1-s} \right)^2 + \left(Q_g + \frac{3U_s^2}{2X_1} \right)^2 = \left(\frac{3X_m}{2X_1} U_s I_r \right)^2 \leq \left(\frac{3X_m}{2X_1} U_s I_{rmax} \right)^2 \quad (9)$$

即定子侧无功功率运行范围受转子侧最大电流的限制。

2 变速恒频 DFIG 运行区域划分

根据《技术规定》中要求风电机组无功功率满足功率因数在超前 0.95 到滞后 0.95 的范围内动态可调,同时考虑 DFIG 的静态稳定极限,按照文献[9]中机组模型参数得到 DFIG 的输出功率运行范围,即图 2 中的区域 ABEFC。

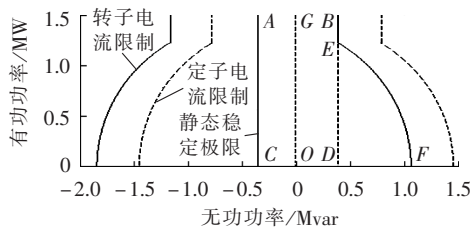


图 2 DFIG 运行范围示意图

Fig.2 Schematic diagram of DFIG operating limits

按照无功功率流向的不同以及与有功功率的关系,本文将 DFIG 输出功率分为以下 3 个运行区域:

$$\begin{cases} \text{区域 AGOC: } Q_g < 0 \\ \text{区域 GBDO: } Q_g > 0 \\ \text{区域 EFD: } Q_g > 0, P_g < P_{gmax} \end{cases}$$

下面分别对上述 3 个运行区域进行分析。

a. 当风电机运行于区域 AGOC 时,风电机组输出有功功率不受无功功率的影响,但此时风电机组处于进相运行状态,即从电网中吸收无功功率,这会导致发电机定子铁芯端部发热,加快发电机绝缘的老化。

b. 当风电机运行于区域 GBDO 时,风电机组输出有功功率不受无功功率的影响,但增发无功会加大发电机端电流,加快发电机绝缘的老化。

以上 2 种情况,无功功率费用应为单位无功容量价格与发出或吸收的无功容量的乘积再加上机组运行维护费用。在实际应用中,由于多发无功产生的发电机运行维护费用难以界定,且数额相对较小,因此在计算中往往忽略。

c. 当风电机运行于区域 EFD 时,一旦发生电网故障等紧急情况将会迫使风电机组增发无功功率,这会造成有功出力 and 功率因数降低,影响风电机组所属开发商的经济收益。此时无功功率费用还应加上多发无功产生的机会成本。

综上,为了兼顾电网公司和开发商的利益,需要根据风电机组的运行区域进行无功定价,以补偿开发商的经济损失,并调动其参与接入电网无功电压调节的积极性。根据本文分区,每个运行区域单位时间的无功功率费用如式(10)所示:

$$C_{QC} = \begin{cases} \rho_{Q1} Q_g & P_g, Q_g \in \text{区域 AGOC} \\ \rho_{Q2} Q_g & P_g, Q_g \in \text{区域 GBDO} \\ \rho_{Q2} Q_g + \rho_P \Delta P_g & P_g, Q_g \in \text{区域 EFD} \end{cases} \quad (10)$$

其中, ρ_{Q1} 、 ρ_{Q2} 分别为区域 AGOC 和 GBDO 的边际无

功价格; ρ_p 为有功功率边际价格; ΔP_g 为增发无功而少发的有功功率。

3 基于 DFIG 运行分区的无功优化模型

3.1 目标函数

本文以有功网损经济损失、发电机输出无功功率产生费用最小为目标函数,同时嵌入罚函数形式的电压越限指标,则总目标函数为:

$$F = \min \left[\rho_p P_{\text{loss}} + C_{QG} + \lambda \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta U_i}{U_{\text{imax}} - U_{\text{imin}}} \right)^2 \right] \quad (11)$$

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_{\text{imin}} - U_i & U_i < U_{\text{imin}} \\ 0 & U_{\text{imin}} \leq U_i \leq U_{\text{imax}} \\ U_i - U_{\text{imax}} & U_i > U_{\text{imax}} \end{cases}$$

其中, P_{loss} 为电网有功网损; ΔU_i 为节点 i 电压幅值越限量; U_{imax} 、 U_{imin} 分别为节点 i 电压幅值上限和下限; λ 为罚函数系数; n 为节点数。

3.2 约束条件

含风电场无功优化问题的约束条件需要在传统无功优化约束条件的基础上,考虑风电场接入带来的影响。本文对传统无功优化约束条件(如控制变量、状态变量的不等式约束)不加赘述,仅列出考虑风电场并网后引入的约束条件。

a. 功率等式约束。

$$\begin{cases} h_p(P_{Gi}, P_{gi}, P_{Li}, P_i) = 0 \\ h_q(Q_{Gi}, Q_{gi}, Q_{Li}, Q_i) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为常规发电机组有功、无功出力; P_{gi} 、 Q_{gi} 分别为节点 i 接入风电场有功、无功出力; P_{Li} 、 Q_{Li} 分别为节点有功、无功负载; P_i 、 Q_i 分别为节点注入有功、无功出力。

同时风电场节点还需满足式(8)功率极限关系。

b. 不等式约束。

风力发电机功率极限约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{gi} \leq P_{g\text{max}i} \\ Q_{g\text{min}i} \leq Q_{gi} \leq Q_{g\text{max}i} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $P_{g\text{max}i}$ 、 $Q_{g\text{max}i}$ 、 $Q_{g\text{min}i}$ 分别为节点 i 接入风电场有功出力上限以及无功出力上、下限。

4 混合智能算法求解含风电场的配电网无功优化问题

4.1 BFO 算法

BFO 算法的理论基础是觅食理论,在觅食理论中,自然法则倾向于保留大量繁殖觅食能力强的生物,并淘汰觅食能力弱的生物。在实际应用中,BFO 算法主要通过趋向性操作、复制操作和迁徙操作这 3 种操作迭代计算来求解问题。

a. 趋向性操作。

设细菌种群大小为 S ,一个细菌所处的位置表示

问题的一个候选解,细菌 i 的信息用 D 维向量表示为 $\theta^i = [\theta_1^i, \theta_2^i, \dots, \theta_D^i]$ ($i=1, 2, \dots, S$), $\theta^i(j, k, l)$ 表示细菌 i 在第 j 次趋向性操作、第 k 次复制操作和第 l 次迁徙操作之后的位置。细菌 i 的每一步趋向性操作表示如下:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i, j) \frac{\Delta(i)}{\sqrt{\Delta^T(i) \Delta(i)}} \quad (14)$$

其中, $C(i, j)$ 为细菌的趋向性步长, $\Delta(i)$ 为单位长度的随机方向向量。

b. 复制操作。

设需要淘汰的细菌种群数为 $S_r = S/2$ 。将种群中的所有个体按照所处位置的优劣进行排序,选取前 S_r 个细菌进行自我复制,并替换后 S_r 个细菌。这样,经过新的复制操作,会使群体中的优良个体得到保留,不良个体被淘汰,既提高了寻找最优解的速度,又保持了群体的多样性。

c. 迁徙操作。

迁徙操作是按照给定的概率 P_{el} 发生的,如果某个个体满足迁徙操作的条件,那么就将此个体删除,重新生成一个新的个体,相当于将原来的个体转移到了一个新的位置,这样更有利于趋向性操作跳出局部最优解和寻找全局最优解。

4.2 混合智能算法

BFO 算法最为突出的特点是具有较强的局部搜索能力,但全局搜索能力不强,原因在于 BFO 算法通过集群通信方式交换集体信息,不具备对菌群最优信息的记忆功能。而 PSO 算法采用群体协同搜索,并能够记忆全局种群的最优信息,因此可以考虑将 PSO 算法作为变异算子与 BFO 算法相结合,以提高算法的综合搜索能力。

混合智能算法通过 PSO 变异算子来扩展社会信息,完成全局空间的搜索,算子可表示为:

$$v_{id}^{\text{new}} = \omega v_{id}^k + c_1 \text{rand}() (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}() (p_{gl} - x_{id}^k) \quad (15)$$

其中, ω 为惯性权重; c_1 、 c_2 为学习因子; x_{id}^k 为细菌当前位置; p_{id} 为单个细菌最优位置; p_{gl} 为全局最优位置。

在完成一个趋化步骤后,每个细菌通过 PSO 算子变异,在这个阶段,变异的细菌会在整个空间中寻找当前时刻全局最好的位置。将通过变异算子得到的群体信息作为新的方向向量加入到位置更新方程式(14)中,得到:

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j+1, k, l) + C(i, j+1) v_{id}^{\text{new}} \quad (16)$$

但是由于所求目标函数解空间的复杂性和多维性,依然存在陷入局部最优解的可能性。为了进一步提高优化前期的全局搜索能力以及优化后期的局部搜索能力,本文将自适应步长思想^[12]引入到混合智能算法中,将趋向性操作时的步长调整为动态值,并根据循环次数而改变,如式(17)所示:

$$C(i,j+1)=\frac{C(i,j)-C(N_c)}{N_c+C(N_c)}(N_c-j) \tag{17}$$

其中, i 为细菌个体; j 为趋向性操作次数; N_c 为运行最大趋向性操作次数; $C(N_c)$ 为常参数。

在优化前期, $C(i,j+1)$ 较大, 提高了个体解空间移动能力, 避免在局部范围过多地消耗搜索时间; 在优化后期, $C(i,j+1)$ 减小, 使得个体在接近全局最优附近的局部搜索能力增强, 保证算法最终趋近全局最优。映射到细菌觅食行为中, 相当于加快了细菌觅食能力和速度, 从细菌群体角度来看, 是保留了优秀细菌的基因, 增强了细菌群的繁殖和迁徙能力。

综上, 本文提出的混合智能算法的步骤如下。

a. 初始化参数: 给定群体规模细菌数目 S , 解空间维数 p , 趋向性操作次数 N_c , 前进最大步数 N_s , 趋化步长初始值 $C(i)$, 复制操作次数 N_{re} , 迁徙操作次数 N_{el} , 迁徙概率 P_{el} , 以及 PSO 变异算子的相关参数。

b. 趋向性操作: 对每个细菌进行一次翻转, 并将适应值保存为 J_{last} 。如果当前值比前一个值更好且未达到同方向前进次数限制, 则前进。考虑细菌群体的集群行为, 在完成一个趋化步骤后, 利用式 (15)、(16) 更新细菌位置, 利用式 (17) 更新步长, 并检查是否超过趋化性步数 N_c , 若超过就进入步骤 **c**, 否则继续执行步骤 **b**。

c. 复制操作、迁徙操作与标准 BFO 算法计算流程相同, 并检查相应的操作次数。

混合智能算法流程图见图 3。

5 算例分析

本文以改进的 IEEE 33 节点^[13]系统为例进行验证计算。其中节点 1 处接一台有载调压变压器, 可调节档位为 ± 8 档, 调节变比为 2.5%。节点 6、29 处各并联一台无功补偿装置, 调节范围分别为 100 kvar $\times$ 5 以及 150 kvar $\times$ 5。节点 17 接入 3 台 1.5 MW DFIG, 切入风速、额定风速和切出风速分别为 3.5、11.2、20 m/s。有功边际电价为 200 元/(MW $\cdot$ h), 风电机组无功功率边际电价按照本文分区顺序分别取为 30、15 元/(Mvar $\cdot$ h)。考虑电压越限范围较小, 取 $\lambda=1\times 10^3$ 。PSO 算法粒子数为 20, 学习因子取 2, 惯性权重随迭代次数从 0.95 到 0.02 变化, 最大迭代次数为 100 次。选取细菌群体数为 26, 趋向性操作次数为 50, 复制操作次数为 4, 迁徙操作次数为 4, 迁徙概率

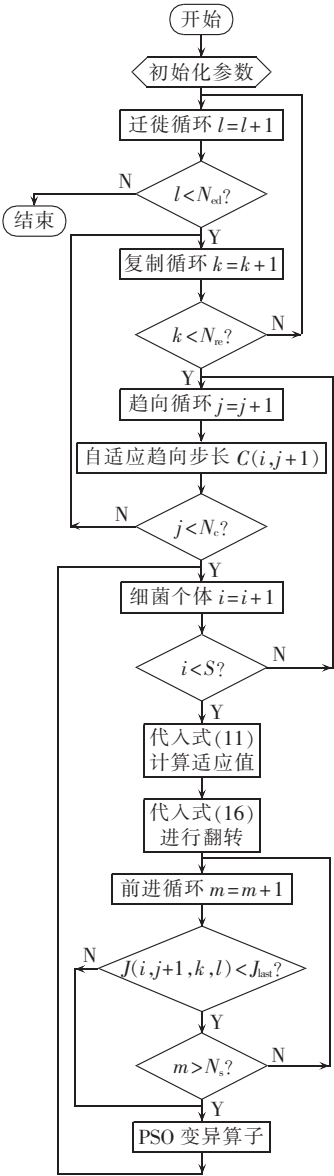


图 3 混合智能算法的计算流程图
Fig.3 Flowchart of hybrid intelligent algorithm

为 0.25, 初始精度为 10^{-6} 。

本文选取风速变化较快的一段时间进行分析, 并把该时段分成 4 个子时段。每个时段风速对应的风电机组有功出力、无功功率分区范围如表 1 所示。

为了验证本文所提方法的有效性, 分别计算了计及和不计及 DFIG 无功调节能力下的系统网损, 优化结果如表 2 所示。

由表 2 看出, 计及 DFIG 无功调节能力之后, 系统网损明显减小, 这说明 DFIG 可以作为可调无功电

表 1 各时段有功出力及无功功率分区
Tab.1 Active power and reactive power zones of different periods

节点号	时段 1		时段 2		时段 3		时段 4	
	有功功率/MW	无功功率分区范围/Mvar	有功功率/MW	无功功率分区范围/Mvar	有功功率/MW	无功功率分区范围/Mvar	有功功率/MW	无功功率分区范围/Mvar
17	2.4	(-1.071, 0)	3.6	(-1.071, 0)	1.8	(-1.071, 0)	3.0	(-1.701, 0)
		(0, 1.479)		(0, 1.479)		(0, 1.479)		(0, 1.479)
		(1.479, 2.458)		(1.479, 1.672)		(1.479, 2.911)		(1.479, 1.98)

表 2 系统网损
Tab.2 Network loss

条件	网损/MW			
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4
不计及 DFIG	0.1550	0.1815	0.1587	0.1693
计及 DFIG	0.0972	0.1439	0.0923	0.1138

源参与电网无功电压调节,但是需要电网公司按照

一定的无功定价原则,即本文提出的依据 DFIG 运行区域进行划分,向所属开发商购买无功功率。

为说明混合智能算法在求解无功优化模型方面的有效性和优越性,本文采用 PSO 算法作为参考,表 3、4 为 2 种算法的无功优化结果的比较(表中节点最低电压为标么值)。

表 3 无功优化结果(1)
Tab.3 Results of reactive power optimization(1)

算法	时段 1		时段 2		时段 3		时段 4	
	系统网损/MW	节点最低电压	系统网损/MW	节点最低电压	系统网损/MW	节点最低电压	系统网损/MW	节点最低电压
本文算法	0.0972	0.989	0.1439	0.993	0.0923	0.984	0.1138	0.991
PSO 算法	0.1048	0.983	0.1541	0.984	0.0993	0.981	0.1174	0.983

表 4 无功优化结果(2)
Tab.4 Results of reactive power optimization(2)

算法	时段 1		时段 2		时段 3		时段 4	
	风机输出 无功/Mvar	无功费用/ [元·(Mvar·h) ⁻¹]	风机输出 无功/Mvar	无功费用/ [元·(Mvar·h) ⁻¹]	风机输出 无功/Mvar	无功费用/ [元·(Mvar·h) ⁻¹]	风机输出 无功/Mvar	无功费用/ [元·(Mvar·h) ⁻¹]
本文算法	1.5141	24.0	1.380	20.70	0.371	5.5655	0.7422	11.133
PSO 算法	1.6138	28.5	1.493	23.85	0.900	13.5000	1.2394	18.591

由表 3、4 可见,在每个时段内,混合智能算法优化后所得有功网损、无功功率费用均明显低于 PSO 算法优化结果。这表明本文所提算法具有较强的搜索能力,可以在保证节点电压不越限的前提下,对控制变量进行优化调节,使得无功功率费用更低。同时分别对混合智能算法和 PSO 算法进行 50 次独立计算,得到最优解的平均迭代次数为 18 次和 43 次。这说明混合智能算法具有更快的收敛速度和较好的收敛稳定性。

6 结论

本文将基于无功功率运行分区的定价原则应用于电力市场环境下含 DFIG 的配电网无功优化问题,同时采用基于自适应变步长的 BFO-PSO 智能混合算法对所建立模型进行求解,较好地解决了风电机组并网运行带来的新问题,并得到如下结论:

- a. 本文所提出的基于变速恒频 DFIG 无功功率运行分区的定价原则兼顾了电网公司和风电机组所属开发商的利益,使得电网公司在无功功率支出费用最低的情况下,充分调动风电场参与电网无功电压调节,保证电网的安全稳定运行;
- b. 采用混合智能算法求解无功优化模型,算例分析结果表明,该方法具有较强的搜索性能和收敛速度,为求解电力系统无功优化问题提供一种新途径。

参考文献:

[1] LI Yunwei,VILA THGAMUWA D M. A grid-interfacing power quality compensator for three-phase three-wire microgrid applications[J]. IEEE Trans on Power Electronics,2006,21(4):1021-1031.

[2] 撤奥洋,邓星,文明浩. 高渗透率下大电网应对微网接入的策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):78-83.
HAN Aoyang,DENG Xing,WEN Minghao. Strategy of large power system coping with accession of microgrid with high penetration[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):78-83.

[3] 严干贵,王茂春,穆钢,等. 双馈异步风力发电机组联网运行建模及其无功静态调节能力研究[J]. 电工技术学报,2008,23(7):98-104.
YAN Gangui,WANG Maochun,MU Gang,et al. Modeling of grid-connected doubly-fed induction generator for reactive power static regulation capacity study[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(7):98-104.

[4] LEE K Y. Optimal reactive power planning using evolutionary programming,evolutionary strategy,genetic algorithm and linear programming[J]. IEEE Trans on Power System,1998,13(1):101-108.

[5] 张粒子,舒隽,林宪枢,等. 基于遗传算法的无功规划优化[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):5-8.
ZHANG Lizi,SHU Jun,LIN Xianshu,et al. Reactive power planning based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2000,20(6):5-8.

[6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化[J]. 中国电机工程学报,2008,28(7):40-45.
CHEN Haiyan,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong. Reactive power optimization in distribution system with wind power generators[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(7):40-45.

[7] 何禹清,彭建春,毛丽林,等. 含多个风电机组的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):37-41.
HE Yuqing,PENG Jianchun,MAO Lilin,et al. Reactive power optimization in distribution system with multiple wind power generators[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(19):37-41.

[8] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含分布式电源的配电网无功优化[J]. 电工技术学报,2011,26(3):168-174.
ZHANG Li,XU Yuqin,WANG Zengping,et al. Reactive power

- optimization for distribution system with distributed generators [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 168-174.
- [9] 赵晶晶,符杨,李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 33-38.
- ZHAO Jingjing, FU Yang, LI Dongdong. Reactive power optimization in distribution network considering reactive power regulation capability of DFIG wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 33-38.
- [10] 王伟胜,迟永宁,戴慧珠,等. GB/T19963—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.
- [11] 郎永强,张学广,徐殿国,等. 双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 77-82.
- LANG Yongqiang, ZHANG Xueguang, XU Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82.
- [12] FARHAT I A, EL-HAWARY M E. Dynamic adaptive bacterial foraging algorithm for optimum economic dispatch with valve-point effects and wind power[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(9): 989-999.
- [13] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [14] 黄志刚,李林川,杨理,等. 电力市场环境下的无功优化模型及其求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 79-83.
- HUANG Zhigang, LI Linchuan, YANG Li, et al. The reactive power optimization model under power market and its solution [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 79-83.
- [15] LEE K Y. Optimal reactive power planning using evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm and linear programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(1): 101-108.
- [16] 赵波,曹一家. 电力系统无功优化的多智能体粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 1-7.
- ZHAO Bo, CAO Yijia. A multi-agent particle swarm optimization algorithm for reactive power optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 1-7.

作者简介:

周冬旭(1984-),男,辽宁葫芦岛人,博士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制(E-mail:zdx2001@163.com);

李晓明(1955-),男,湖北应城人,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统运行与控制、配网自动化和电力电子技术在电力系统中的应用。

Reactive power optimization model and its algorithms for distribution system with wind farm in electricity market

ZHOU Dongxu, LI Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: From the perspective of electricity market and based on the research of variable-speed constant-frequency DFIG(Doubly-Fed Induction Generator), the output power of DFIG is divided into three operational zones according to the direction of reactive power and the relationship between reactive power and active power, and the corresponding function for calculating the reactive power costs is given for each zone. The reactive power optimization model is established, which takes the minimum power loss, reactive power cost and voltage limit violation as its objectives, and solved by the hybrid intelligent algorithm of bacteria foraging optimization and particle swarm optimization with adaptive step-size, which improves the global searching ability in early stage and the local searching ability in late stage to avoid the easy local optimal solution of bacteria foraging optimization. Case simulation shows that, the proposed method effectively reduces the network loss and fully mobilizes the wind farm in the reactive voltage regulation.

Key words: wind power; doubly-fed induction generator; hybrid intelligent algorithm; reactive power; optimization; models