

基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化

段建东, 杨 杉

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以双馈型风电机组为研究对象, 建立以风电无功功率、并联电容器投运组数为优化变量, 以电压稳定性最好、电压偏差最小和有功网损最小为目标的无功优化模型。在对差分进化方法进行改进的基础上, 研究基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化算法。在 IEEE 33 节点系统中进行算例测试, 结果验证了无功优化算法的有效性, 合理调度双馈风力发电机有利于配电网的运行优化与电能质量的改善。

关键词: 双馈风力发电机; 差分进化法; 无功; 优化; 风电场; 模型

中图分类号: TM 744; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.11.022

0 引言

分布式风力发电具有发电方式灵活、资源利用充分、环境污染小、能耗降低等优点, 在众多分布式发电中技术相对成熟, 因此分布式风电近年来发展迅速, 与大电网共存成为智能电网的发展趋势。

但是, 随着分布式风电的接入及其规模增大, 原有配电网的潮流受到很大影响^[1]。风速大小、负荷需求的随机变化, 风电场运行方式的不断调整, 很容易造成无功功率与电压的波动, 影响到配电网的电压质量。若风电的渗透率过高, 甚至会带来配电网过电压或电压稳定性变差的现象, 即造成更为严重的电压问题。因此, 为了保证合格的电能质量、有效地降低网损, 并且使得在分布式风电运行时, 配电网有较高的电压稳定性, 非常有必要对配电网的无功功率分布进行合理的优化。

目前, 接有风电场配电网无功优化的研究成果主要包括: 文献[2]依据风功率发出将风电场运行方式分为额定运行、欠额定运行、停机 3 种场景, 分别进行优化分析, 给出优化结果的概率期望, 将其作为整个配电网的最优无功电源配置; 文献[3]则是利用了随机响应面法来解决风电场并网运行的不确定性问题, 并基于该概率模型进行优化; 文献[4]考虑到风电的随机性, 对一天中某几个代表性时段做无功优化, 得到不同时段的配电网无功配置情况, 但没有考虑负荷的变化。若配电网中采用 SVC 无功补偿, 风电场和 SVC 的安装节点都要进行优化分析^[5]。

总体而言, 含风电场的配电网无功优化模型都

设定得比较理想, 没有考虑到风速以及负荷同时变化对无功功率分布的影响, 而且理想的优化结果难以适应配电网每天的多种运行方式。

无功优化计及多个控制变量与约束条件, 属于非线性问题, 优化的方法很多, 主要分为传统的数学优化算法和智能优化算法, 而无功优化控制变量既有连续量又有离散量, 因此运用传统的优化算法有局限性。目前研究的无功优化方法主要是智能算法, 如遗传算法^[6-7]、粒子群算法^[8]、禁忌搜索算法^[9]等。差分进化 DE (Differential Evolution) 法是近年来新出现的智能优化算法, 具有收敛速度快、鲁棒性强、原理简单等优点^[10], 已引起多个领域研究者的兴趣^[11-12]。

因此, 本文针对含分布式双馈型风电场和不断变化负荷需求的配电网, 对一天之中的风电发出功率和配电网负荷在不同时段不同的情况, 建立考虑电压质量、电压稳定性、网络损耗的无功优化模型, 对差分进化法进行改进, 并用于该优化模型, 最后以 IEEE 33 节点的配电网为算例, 仿真分析优化模型和改进算法的有效性。

1 双馈风力发电机的功率特性分析

1.1 双馈风力发电机的有功特性

无功优化的基础是潮流计算, 在含风电场的配电网潮流计算中关键是如何正确处理风电机组, 因此有必要首先分析风电机组的功率特性。单台机组的有功功率输出 P_1 与风速 v 密切相关, 它们之间可以描述为函数关系式(1)^[13]:

$$P_1 = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v \geq v_{co} \\ k_1 v + k_2 & v_{ci} \leq v < v_N \\ P_N & v_N \leq v < v_{co} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k_1 = P_N / (v_N - v_{ci})$, $k_2 = -k_1 v_{ci}$, P_N 为风电机组额定容量, v_{ci} 、 v_N 、 v_{co} 分别为切入风速、额定风速和切出风速。

1.2 双馈风力发电机的无功特性

双馈风力发电机既可以运行在恒功率因数控制

收稿日期: 2012-11-04; 修回日期: 2013-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707026); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目; 陕西省教育厅专项科研项目(2010JK747)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50707026), Shaanxi Provincial Project of Special Foundation of Key Disciplines and Natural Science Foundation of the Education Department of Shaanxi Province(2010JK747)

模式,又可以运行在恒电压控制模式^[14],都可以进行参与无功功率调节。当双馈型风电场接入配电网时,其无功出力可作为配电网的无功源,进而在无功优化计算中作为控制变量。单台双馈风力发电机发出的有功功率 P_1 与无功功率 Q_1 为^[15]:

$$\begin{cases} \left(\frac{P_1}{1-s}\right)^2 + Q_1^2 = (3U_s I_s)^2 \\ \left(\frac{P_1}{1-s}\right)^2 + \left(Q_1^2 + 3\frac{U_s^2}{X_s}\right)^2 = \left(3\frac{X_m}{X_s} U_s I_r\right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_1 为双馈机发出的有功功率, Q_1 为双馈机发出的无功功率, s 为转差率, U_s 为定子侧电压, I_s 为定子绕组电流, X_s 为定子漏抗, X_m 为励磁电抗, I_r 为转子侧变流器电流。由式(2)可以看出,双馈风力发电机发出的有功功率与无功功率是相关的,某 1.5 MW 双馈风力发电机的 $P-Q$ 曲线如图 1 所示。

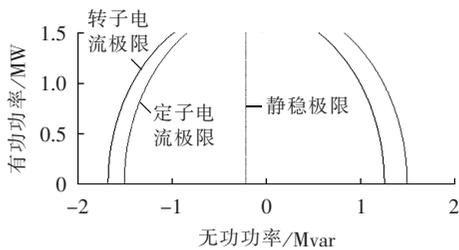


图 1 某 1.5 MW 风机的 $P-Q$ 曲线

Fig.1 $P-Q$ curve of a 1.5 MW wind turbine

从图 1 可见,随着风电输出有功功率的增加,可调无功功率的范围是减小的,并且曲线的垂直线为双馈风力发电机的静稳极限,坐标为 $(-3U_s^2/X_s, 0)$ ^[15]。因此,正常运行的双馈风力发电机吸收的无功功率不应大于 $3U_s^2/X_s$,以免造成风机运行的不稳定。

假设风电场中所有双馈风力发电机组都运行在相同的风速条件下,则双馈型风电场只需将单台风力发电的有功功率和无功功率调节范围乘以装机台数,即可得到整个风电场的有功和无功。

2 含双馈型风电场的配电网无功优化模型

电压稳定性是电力系统安全运行的重要因素之一,近年来电力系统因电压失稳而导致系统崩溃,造成停电事故,电力系统电压稳定问题日益受到人们的重视。风力发电作为新型的发电方式,其接入后对配电网电压稳定性的影响值得探讨^[16]。

2.1 配电网电压稳定性指标

对于配电网,设其任意一条支路如图 2 所示,其中 i 和 j 分别为该支路的 2 个节点,潮流方向定义为从 i 流向 j 。

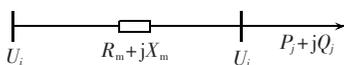


图 2 配电网等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of distribution system

根据支路潮流有解的条件,得到节点 j 电压稳定性指标 S_j 为:

$$S_j = \left(P_j R_m + Q_j X_m - \frac{1}{2} U_i^2\right)^2 - (R_m^2 + X_m^2)(P_j^2 + Q_j^2) \quad (3)$$

其中, $P_j + jQ_j$ 为节点 j 的等效负荷, U_i 为起始节点的电压, $R_m + jX_m$ 为起始节点到负荷节点的等效阻抗。

对于全系统的电压稳定性指标 S_s ,取所有支路最小电压稳定性指标,即:

$$S_s = \min \{S_1, S_2, \dots, S_i, S_j, \dots, S_n\} \quad (4)$$

其中, n 为配电网的节点号。若 $S_s < 0$ 则系统不稳定,即有任意一个节点的电压稳定性指标值小于 0,系统便失去稳定;若 $S_s > 0$,系统稳定,并且 S_s 越小,稳定性越差; $S_s = 0$ 时系统处于临界状态。

2.2 无功优化的目标函数

目标函数以电压稳定性最优、电压偏差和有功网损最小为目标函数;以双馈机的无功出力和配电网中的并联电容器投运组数为优化变量。

由于电压稳定性指标的值 S_s 越大越好,为便于统一表述为最小值,在 S_s 之前施加以负号。这样,含双馈型风电场的配电网无功优化模型的目标函数建立如下:

$$\min f(x) = P_{\text{loss}} + \sum_{i=1}^n (U_i - 1)^2 - S_s + \lambda \sum_{i=1}^n (U_i - U_i^{\text{lim}})^2 \quad (5)$$

其中, $x = [Q_{\text{WF}}, Q_C]$, Q_{WF} 为双馈机的无功出力, Q_C 为投运的并联电容器组数; P_{loss} 为电网的有功网损; U_i 为节点 i 的电压幅值; λ 为惩罚因子,其值为较大的整数,主要作用是防止电压越限; U_i^{lim} 取值如式(6)所示。

$$U_i^{\text{lim}} = \begin{cases} U_i^{\text{max}} & U_i > U_i^{\text{max}} \\ U_i & U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}} \\ U_i^{\text{min}} & U_i < U_i^{\text{min}} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 约束条件

无功优化在实现过程中又受到潮流是否存在的等式约束和电压取值范围、电容器组安装组数以及双馈机无功输出的不等式约束的限制。

等式约束是:

$$\begin{cases} P_i + P_{\text{WFi}} = P_{\text{Di}} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i + Q_{\text{WFi}} = Q_{\text{Di}} + U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_{WFi} 、 Q_{WFi} 分别为风电场向节点 i 注入的有功功率和无功功率, P_i 、 Q_i 分别为电网输入节点 i 的有功功率和无功功率, P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率, U_i 为节点 i 的电压幅值, G_{ij} 、 B_{ij} 、 δ_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导、电纳和节点 i 与 j 之间的相角差。

不等式约束是:

$$U_{i\text{min}} < U_i < U_{i\text{max}} \quad (8)$$

$$C_{Q\min} < C_Q < C_{Q\max} \quad (9)$$

$$Q_{WF\min} < Q_{WF} < Q_{WF\max} \quad (10)$$

其中, $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压的最小值与最大值, $C_{Q\min}$ 、 $C_{Q\max}$ 分别为投运电容器组数的最小值与最大值, $Q_{WF\min}$ 、 $Q_{WF\max}$ 分别为双馈型风电场发出的无功功率的最小值与最大值。

3 基于改进差分进化法的无功优化算法

差分进化法的基本思想是利用种群中 2 个随机选择的不同向量来干扰现有向量, 种群中的每一个向量都要进行干扰, 如果新向量对应的适应度函数比它们的上一代小, 则取代上一代^[17]。由于基本的差分进化法不能直接处理电容器组投切组数这样的离散量。而且, 在处理无功优化问题时, 由于需要不断调用潮流程序, 计算量很大, 如果差分进化的参数选择不当, 会造成收敛速度很慢, 这极大降低了优化效率。因此需要对基本的差分进化法进行一些改进。

3.1 差分进化法的改进

a. 对种群离散化的改进处理。

初始化的操作是:

$$X_{i,j} = X_{i,j\min} + \text{round}(\text{rand}() (X_{i,j\max} - X_{i,j\min})) \quad (11)$$

其中, $X_{i,j}$ 为个体向量 \mathbf{X}_i 的第 j 个分量, $X_{i,j\max}$ 、 $X_{i,j\min}$ 分别为 \mathbf{X}_i 的第 j 个分量的上限与下限, 函数 $\text{rand}()$ 是在 0~1 之间取随机数, $\text{round}()$ 是对目标数值进行四舍五入取整。这样的操作可以涵盖整个变量的取值范围。

变异的操作是:

$$X_{i,j}(t+1) = \text{fix}(X_{r_1,j}(t) + F(X_{r_2,j}(t) - X_{r_3,j}(t))) \quad (12)$$

其中, $\mathbf{X}_i(t)$ 为当前进化个体, i 为当前个体在种群中的序号, t 为进化代数; $\mathbf{X}_{r_1}(t)$ 、 $\mathbf{X}_{r_2}(t)$ 和 $\mathbf{X}_{r_3}(t)$ 为从群体中随机选择的 3 个个体, 且 $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq i$; $\text{fix}()$ 是对目标数值进行截尾取整; F 为缩放因子, 取值为 $[0, 2]$ 。这样的操作可以涵盖整个变量的取值范围。

b. 种群初始化的改进处理。

初始化采用小区间初始化方法, 首先把各待优化的量的取值范围分成种群总数个小区间, 然后再在各个区间中分别随机生成一个初始个体, 这样生成的初始个体将会均匀分布在整个解区间上, 并能保证随机产生的各个个体间有明显的差异性, 保证了初始群体有较丰富的取值, 增强了收敛于全局最优解的可能。

c. 参数的改进处理。

在进行交叉操作时, 要用到交叉概率 δ_{CR} :

$$\delta_{CR} = \delta_{CR\min} + \frac{t(\delta_{CR\max} - \delta_{CR\min})}{t_{\max}} \quad (13)$$

其中, $\delta_{CR\min}$ 、 $\delta_{CR\max}$ 分别为 δ_{CR} 所取的最小值与最大值, t_{\max} 为最大进化代数。

由于较小的交叉概率可以提高算法的局部搜索

能力, 较大的交叉概率可加强种群的多样性和全局收敛性, 因此若采用自适应的交叉因子, 在进化初期采用较小的交叉概率, 可以克服早熟现象, 跳出局部最优解; 在算法后期增大交叉概率, 可以显著地加快算法的收敛。

3.2 基于改进差分进化法的无功优化

将改进后的差分进化法求解模型式(5)~(10)的极值问题, 便形成基于改进差分进化法的含双馈型风电场的无功优化算法。其基本过程包括变异、交叉、选择等。

优化过程中将遇到利用差分进化法解决无功优化的 2 个常见问题, 即等式约束式(7)与不等式约束式(8)~(10)在优化算法中如何体现, 以及变异的值超过规定范围如何处理。本文的解决办法如下。

a. 等式约束在无功优化时实为潮流计算, 在计算目标函数式(5)时要用到潮流计算, 若潮流计算有解, 则说明满足等式约束条件。对于不等式约束, 若潮流计算出来的值超过了不等式约束的条件(例如电压超过了电压约束), 则可以采用惩罚因子来重新构造目标函数。

b. 若变异出来的值超过了约束范围, 主要有 3 种处理方法, 将其设定离其最近的边界值; 在可行域中随机产生参数代替; 进行循环, 直到产生新个体的值都在范围以内。本文采用了第 3 种处理办法。

此外, 由于系统一天之中风速和负荷都在改变, 因而若按照一种运行方式进行优化必然会对别的运行方式带来不利影响。因此, 可将一天平均分为几个时段, 针对每个时段分别进行优化, 达到整个系统一天之中的优化运行。

4 算例分析

4.1 算例系统

对于本文提出的无功优化算法, 采用 IEEE 33 节点系统来进行测试与分析, 该系统详细参数见文献[18]。系统如图 3 所示, 节点 14 和 30 处安装可投切的并联电容器组, 配置情况分别为 4×100 kvar 和 10×100 kvar; 节点 33 接入 2 台 1.5 MW 变速恒频双馈风力发电机组。该系统节点电压的幅值偏离限定为 $\pm 7\%$ 。

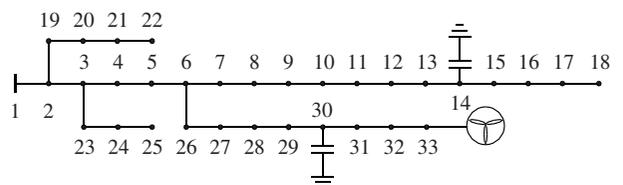


图 3 IEEE 33 节点系统

Fig.3 IEEE 33-bus system

风电场的功率输出曲线^[19]和负荷功率曲线^[20]如图 4 所示,图中的数据全部经过了归一化处理,基准值分别指负荷有功的峰值、负荷无功的峰值和风电场的装机容量。

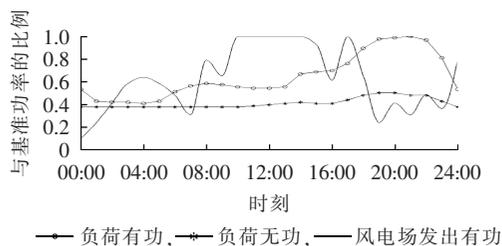


图 4 风电场与负荷的日功率曲线

Fig.4 Daily power curves of wind farm and load

4.2 算例优化结果

改进差分进化法中参数设置为:种群数为 20,最大进化代数 $t_{\max}=50$,变异因子 $F=0.7$,交叉因子 $\delta_{Cr\min}=0.6$, $\delta_{Cr\max}=0.9$ 。将图 4 反映的日功率曲线平均分为 6 个时段,以反映配电网的各种运行情况。不同时段的风电场输出的有功功率、负荷的有功功率和无功功率采用平均值。具体的功率数据和双馈机的无功输出情况如表 1 所示,其中 P_{\max} 、 Q_{\max} 和 P_{wind} 分别代表负荷有功的峰值、负荷无功的峰值和风电场发出的有功功率,时段 1 指 02:00—06:00,时段 2 指 06:00—10:00,其他依此类推。

表 1 各时段风电场输出的有功和对应的无功功率范围以及负荷情况

Tab.1 Load, active power output and reactive power range of wind farm for different periods

时段	$P_{\text{wind}}/\text{MW}$	P_l/P_{\max}	Q_l/Q_{\max}	$Q_{\text{wind}}/\text{Mvar}$
1	1.756	0.45	0.40	[-0.48, 2.314]
2	1.886	0.58	0.40	[-0.48, 2.066]
3	3.000	0.58	0.42	[-0.48, 1.118]
4	2.580	0.74	0.45	[-0.48, 1.580]
5	1.198	0.98	0.52	[-0.48, 2.344]
6	1.120	0.65	0.43	[-0.48, 2.366]

对以上 6 个时段分别进行配电网的无功优化,以更好地反映一天中负荷和风速变化对配电网的影响,使配电网工作在较为理想的状态,即电压稳定性最好、电压偏差和网损最小。经改进差分进化法的配电网无功优化结果如表 2 所示,其中 C_1 和 C_2 分别表

表 2 配电网无功优化结果

Tab.2 Results of reactive power optimization

时段	C_1	C_2	风电场输出无功/Mvar	电压稳定性	电压偏差	网损/MW
1	4	2	-0.48	0.9528	0.0068	0.146
2	4	5	-0.48	0.9103	0.0095	0.142
3	0	0	-0.48	0.8061	0.0261	0.391
4	4	6	-0.48	0.8660	0.0194	0.237
5	4	10	1.88	0.7462	0.0494	0.505
6	4	10	-0.08	0.8604	0.0120	0.103

示节点 14 和 30 的电容器组的投入组数,电压偏差为标么值。

4.3 结果分析

由于本文所提的无功优化目标兼顾了经济性、电能质量与电压稳定性,因此优化出来的结果并不是三者同时达到最优的结果。

时段 1 和时段 2 的负荷比较小,因而电压稳定性、电压偏差和网损值都比较好;时段 3 的结果相对时段 1、2 较差,与时段 1、2 相比,虽然时段 3 负荷也不大,但风电场满发,风电输出过高,造成电压稳定性、电压偏差和网损值都比较差;时段 4 的值要优于时段 3,这是因为瞬时风电输出功率占负荷的比重较小;时段 5 电容器组全部投入,双馈风力发电机也参与发出无功,此时系统中恰好是风电输出最小且负荷最重的情况,所以电压稳定性、电压偏差和网损值都最差;时段 6 的风电场的输出较小,因而需要投入很多的电容器组来满足电压需求。每个时段的优化结果对于该时段是最优的;并且看出负荷的变化对优化结果的改变很大,因此针对不同运行情况进行无功优化使系统运行在最优状态很有必要。

不考虑双馈机风电场的无功功率能力,仅仅使用电容器组来优化系统的无功,目标函数值的对比如表 3 所示。目标函数值差异的大小与风机容量占系统容量的比例有关,比例越大,差异就越大;考虑双馈机的无功后优化效果更好。

表 3 考虑双馈风力发电机无功前后的结果对比

Tab.3 Comparison of results between optimization with and without reactive power of DFIG

情况	目标函数值					
	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6
考虑了双馈机无功	2.316	2.361	6.520	4.314	9.997	2.233
未考虑双馈机无功	2.384	2.466	7.086	4.473	10.188	2.241

在时段 3 风速较大,双馈风力发电机的有功满发,而此时系统负荷并不大,潮流计算显示此时配电网中离风电场较近节点的电压都越限,如图 5 所示,图中电压为标么值。因此,应充分考虑双馈机的无功容量对配电网无功优化的影响。在风电容量过大的情况下,吸收一定的无功,对电压质量改善非常有益。

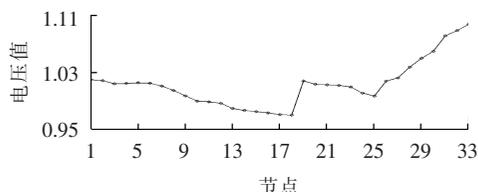


图 5 时段 3 未考虑双馈机无功能力的电压值
Fig.5 Voltage of period 3 without considering reactive power of DFIG

5 结论

本文对含双馈型分布式风电场的配电网无功优化问题进行了研究。考虑到双馈风力发电机的无功发出能力,将其作为无功源参与无功优化。并且在无功优化的模型中考虑了电压稳定性指标,这对风电场的安全稳定运行有现实意义。优化结果使得配电网在一天之中的不同时段都运行在电压稳定性、电压质量和网损综合最佳的状态。优化使用的算法是差分进化法,并进行了数据离散化、种群初始化和参数设置方面的改进,该算法收敛性速度快、效果好,运用在无功优化领域很好地解决了问题,并在 IEEE 33 节点优化算例上进行仿真,验证了改进差分进化法的有效性。

参考文献:

- [1] 康龙云,郭红霞,吴捷. 分布式电源及其接入电力系统时若干研究课题综述[J]. 电网技术,2010,34(11):43-47.
KANG Longyun, GUO Hongxia, WU Jie. Characteristics of distributed generation system and related research issues caused by connecting it to power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(11):43-47.
- [2] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配电网无功优化[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.
- [3] 刘志刚,刘欢,柳杰. 计及风电场概率模型的多目标无功优化[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):197-203.
LIU Zhigang, LIU Huan, LIU Jie. Multi-objective reactive power optimization considering wind farm probabilistic model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1):197-203.
- [4] 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.
- [5] HORTENSIA A, MONICA A. Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(7):2575-2586.
- [6] 李晶,王素华,谷彩连. 基于遗传算法的含分布式发电的配电网无功优化控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(6):60-63.
LI Jing, WANG Suhua, GU Cailian. Research of reactive power optimization control in distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6):60-63.
- [7] 赵亮,吕剑虹. 基于改进遗传算法的风电场多目标无功优化[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):84-88.
ZHAO Liang, LÜ Jianhong. Multi-objective based reactive power on improved optimization of wind farm genetic algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10):84-88.
- [8] 温步瀛,江岳文,陈冲. 风电场并网运行的无功补偿优化问题[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):42-46.
WEN Buying, JIANG Yuewen, CHEN Chong. Reactive power compensation optimization for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(5):42-46.
- [9] 钟红梅,任震,张勇军,等. 免疫算法及其在电力系统无功优化中的应用[J]. 电网技术,2004,28(3):16-19.
ZHONG Hongmei, REN Zhen, ZHANG Yongjun, et al. Immune algorithm and its application in power system reactive power optimization[J]. Power System Technology, 2004, 28(3):16-19.
- [10] NAISMU N, HITOSHI I. Accelerating differential evolution using an adaptive local search[J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2008, 12(1):107-125.
- [11] 裴兰珍,甘传付,邢波,等. 采用改进差分进化算法的防空导弹火力分配[J]. 计算机工程与应用,2012,48(22):235-238.
PEI Lanzen, GAN Chuanfu, XING Bo, et al. Firepower distribution of surface to air missile based on improved differential evolution algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(22):235-238.
- [12] STORE R. Designing nonstandard filters with differential evolution[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(1):103-106.
- [13] 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 optimization in distribution system with multiple wind power generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19):37-41.
- [14] ENGELHARDT S, ERLICH I, FELTES C. Reactive power capability of wind turbines based on doubly fed induction generation[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2011, 26(1):364-372.
- [15] SANTOS-MARTIN D, ARNALTES S, RODRIGUEZ A J L. Reactive power capability of doubly fed asynchronous generators[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(11):1837-1840.
- [16] 金海峰,吴涛. 风电接入系统后的电压稳定问题[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):82-84.
JIN Haifeng, WU Tao. Voltage stability after grid-connection of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(9):82-84.
- [17] SIVASUBRAMANI S. Sequential quadratic programming based differential evolution algorithm for optimal power flow problem[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(11):1149-1154.
- [18] 王守相,王成山. 现代配电网系统分析[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [19] 赵晶晶. 含分布式发电的配电网优化运行研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
ZHAO Jingjing. Study on distribution network optimal operation with grid-connected distributed generation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [20] SHENKMAN A L. Energy loss computation by using statistical[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1):254-258.

作者简介:

段建东(1973-),男,湖南武冈人,教授,博士,研究方向为电力系统继电保护、分布式风电(**E-mail**:duanjid@xaut.edu.cn);
杨杉(1986-),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为分布式风电(**E-mail**:54803510@qq.com)。

(下转第 133 页 continued on page 133)

- systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011, 58(6):2427-2434.
- [12] LIU Fangrui,DUAN Shanxu,LIU Fei. A variable step size INC MPPT method for PV systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(7):2922-2628.
- [13] 傅望,周林,郭珂,等. 光伏电池工程用数学模型研究[J]. 电工技术学报,2011,26(10):211-216.
- FU Wang,ZHOU Lin,GUO Ke,et al. Research on engineering analytical model of solar cells[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(10):211-216.
- [14] 焦阳,宋强,刘文华. 光伏电池实用仿真模型及光伏发电系统仿真[J]. 电网技术,2010,34(11):198-202.
- JIAO Yang,SONG Qiang,LIU Wenhua. Practical simulation model of photovoltaic cells in photovoltaic generation system and simulation[J]. Power System Technology,2010,34(11): 198-202.

- [15] 王岩,李鹏,唐劲飞. 基于模糊参数自校正 PID 方法的光伏发电系统 MPPT 控制[J]. 电力自动化设备,2008,28(3):55-58.
- WANG Yan,LI Peng,TANG Jinfei. MPPT of PV generation system based on fuzzy parameter self-tuning PID control [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(3):55-58.

作者简介:

唐磊(1988-),男,贵州普安人,硕士研究生,研究方向为微电网运行控制与保护(E-mail:freedom_tl@163.com);

曾成碧(1969-),女,四川资中人,副教授,博士,研究方向为分布式发电与微电网;

徐伟(1980-),男,重庆人,研究员,博士,研究方向为电机及其驱动系统;

苗虹(1971-),女,安徽阜阳人,副教授,博士,研究方向为分布式发电与微电网运行控制。

Variable-step adaptive MPPT algorithm for photovoltaic system

TANG Lei¹,ZENG Chengbi¹,XU Wei^{1,2},MIAO Hong¹

(1. School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering,Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430000,China)

Abstract: Since the slopes of photovoltaic $P'(U)$ - U characteristic curve at two sides of the maximum power point are different,the selection of step and velocity factor in traditional variable-step algorithms is difficult. A variable-step adaptive MPPT(Maximum Power Point Tracking) algorithm is proposed,which sets the step adaptively according to the geometric characteristics of photovoltaic $P'(U)$ - U curve. Compared with other variable-step algorithms,the proposed algorithm avoids the calculation of maximum step and velocity factor, the complicated computation process and the dead zone caused by improper step. Simulative results show its good dynamic tracking velocity and steady-state tracking precision.

Key words: photovoltaic cells; maximum power point tracking; variable-step; adaptive algorithm; stability

(上接第 127 页 continued from page 127)

Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms

DUAN Jiandong,YANG Shan

(School of Automation and Information Engineering,Xi'an University of Technology,Xi'an 710048,China)

Abstract: A reactive power optimization model is built for the DFIG(Doubly-Fed Induction Generator) unit of wind farm,which takes the reactive power of wind farm and the operating number of parallel capacitors as its optimization variables and the best voltage stability,the smallest voltage deviation and the least power loss as its objectives. The reactive power optimization algorithm based on the modified differential evolution algorithm is developed for the power distribution system with DFIG wind farms. It is tested in IEEE 33-bus system and results show its effectiveness. The rational dispatch of DFIG is helpful for the optimal operation of power distribution system and the improvement of power quality.

Key words: DFIG; differential evolution algorithm; reactive power; optimization; wind farms; models