

9-3-2020

The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection

Jie WU

Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Qingdan SHI

Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Shan LI

Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Chenyang WEN

Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

WU, Jie; SHI, Qingdan; LI, Shan; and WEN, Chenyang (2020) "The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 2, Article 15.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.015

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/15>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

考虑电缆选型双馈机组分散协调控制 对风电场无功优化影响

吴 杰, 师庆丹, 李 珊, 温晨阳

(燕山大学电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:随着技术发展,双馈式风力发电机成为风电场主流,风电场内部电压波动及网络损耗优化研究也越来越重要。该文基于风机位置的电缆选型,分析双馈机组的无功极限,充分利用风机无功调节能力,将每台风机无功出力、静止无功补偿装置无功出力作为连续控制变量,有载调压变压器分接头位置及风电场固定无功补偿器组数作为离散控制变量,建立综合考虑风电场有功网损和总电压偏差的目标函数,并通过线性递减权重粒子群算法进行分析,得到风电无功优化最优解。通过算例表明:考虑电缆选型的双馈式风力发电机分散协调控制能有效降低网损及电压波动。

关 键 词:双馈式风力发电机;无功极限;电缆选型;无功优化;粒子群算法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.015 中图分类号:TM614 文章编号:1673-9140(2020)02-0113-07

The influence of decentralized and coordinated control of DFIG on reactive power optimization for wind farm considering cable selection

WUJie, SHI Qingdan, LI Shan, WEN Chenyang

(Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: With the increasing of the wind power penetration, the network loss and voltage fluctuation of the wind farm is becoming more and more serious. In this paper, the cable selection based on the location of Doubly Fed Induction Generator (DFIG) is studied, and the DFIG's reactive power limit is analyzed. DFIG is commonly utilized to supply reactive power for power grid, thus, the reactive power of DFIG, the number of fixed reactive compensation device, the reactive power output of Static Var Compensator (SVC) and the on-load tap changing transformer tap are taken as the control variables. Then, the minimum objective function is established as the sum of total voltage deviation and active power loss of wind farm. The discrete variable is analyzed by employing the Linear decreasing Weight Particle Swarm Optimization (LinWPSO), and the optimal solution of reactive power optimization is successfully obtained. Finally, a case study is included for verification. It is shown that the decentralized and coordinated control of DFIG which considering cable selection can effectively reduce network losses and voltage fluctuations.

Key words: DFIG; reactive power limits; cable selection; optimal reactive power dispatch; LinWPSO

为缓解资源匮乏和环境污染等问题,风能作为可再生清洁能源,越来越受到人类青睐。随着技术的发展,风力发电在电网中的比例正逐步提高。根据国家能源局《中国 2050 年高比例可再生能源发展情景暨路径研究》报告,在高比例可再生能源的目标假设下,截止 2050 年,风力发电容量将发展提升至 35.2%,成为支柱性技术。

双馈式风力发电机(doubly fed induction generator, DFIG)是目前风电场的主流机型,通过对有功和无功功率的解耦控制,使其实现调节动态无功的能力^[1]。为进一步减少风电场网络损耗、降低电压波动,可以采取风电场内无功优化控制^[2]。

国内外学者针对风电场无功优化问题进行了深入研究。文献[3]充分考虑了 DFIG 无功调节能力在配电网无功优化的应用;文献[4]考虑了包含不同风机的风电场静态无功补偿的配置方法;文献[5-6]在进行含风电配电网无功分配时,充分考虑风电功率概率分布的不确定性;文献[7]针对差分进化法进行了改进,并建立含 DFIG 风电场的配电网进行无功优化;文献[8]在风电场配电网中,利用电压稳定极限曲面法向量指标进行无功补偿节点选址的基础上,采用遗传算法进行无功优化;文献[9]阐释了电网电压与风电场无功输出的关系,通过定量计算,研究发现 DFIG 的无功输出可以使汇流站无功补偿容量大幅减少;文献[10]研究了分散式风电场中考虑风速变化相关性与单机预测出力,从而进行不同时间等级的多目标无功优化控制;文献[11-14]通过对含 DFIG 风电场的无功输出进行优化,从而提高电网电压稳定性并降低网络损耗;文献[15]充分考虑风能不确定性及 DFIG 无功输出范围受有功输出的影响,针对电网电压控制提出无功优化策略。

上述文献均未对机间电缆进行选型研究,未考虑风电场中 DFIG 位置及机间电缆对无功优化的影响。该文重点研究风电场电缆选型,分析 DFIG 无功极限,建立以风电场总电压偏差和系统网损最小为目标函数,以每台 DFIG 及静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)无功出力、有载调压变压器分接头位置、固定电容器组数为控制变量的数学模型并求解,算例仿真验证其正确性。

1 风电场电缆选型研究

风电场面积较大,风机之间距离较远,电缆用量较大,造价占比较高,而风电场发电过程中电缆损耗也较为明显。因此,应根据电缆经济截面选择风机间电缆。

经济截面^[16]为

$$S_{ec} = \frac{I_{max}}{j} = \frac{1\ 000 I_{max}}{\sqrt{\frac{A}{FR}}} \quad (1)$$

式中 S_{ec} 为经济截面; A 为与导体尺寸相关的单位长度成本可变量; j 为导体经济电流密度; R 为单位长度单位面积视在交流电阻。其中,

$$F = \frac{N_p N_c \cdot (\tau P + D) \cdot \Phi}{1 + \frac{i}{100}} \quad (2)$$

式中 N_c 、 N_p 分别为传输同样型号和负荷值的回路和每回路相线数目; i 为电缆使用期内每年因损耗所花费的资金,一般取值为 8%; τ 为最大负荷损耗时间; P 为电价值; D 为因损耗所额外增加的供电容量的成本。其中,

$$\Phi = \sum_{n=1}^N r^{n-1} = \frac{1-r^N}{1-r} \quad (3)$$

式中 N 为电缆经济寿命,一般取 $N = 25$ a。

$$r = \frac{(1+a/100)^2 \times (1+b/100)}{1+i/100} \quad (4)$$

式中 a 为负荷增长率,取 $a = 0$; b 为能源成本增长率。

$$R = \rho_{20} B K_1 = \rho_{20} B \cdot [1 + \alpha_{20} (\theta_m - 20)] \quad (5)$$

式中 α_{20} 为铜导体电阻在 20 °C 时的温度系数; ρ_{20} 为铜导体在 20 °C 时直流电阻率; θ_m 为导体温度; B 为综合邻近效应、集肤效应系数。

2 双馈式风力发电机无功极限分析

DFIG 可以通过控制变流器实现有功和无功功率的解耦,从而具备无功功率动态调节能力^[1],其结构如图 1 所示。

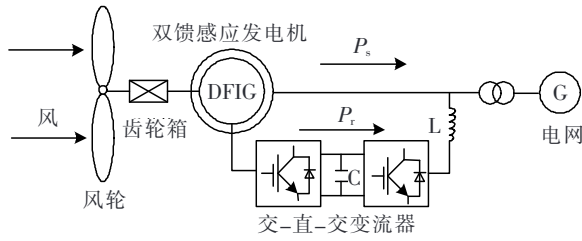


图 1 双馈式风力发电机结构

Figure 1 The structure of doubly fed induction generator

DFIG 的无功功率分为定子侧和网侧变流器无功功率。定子侧功率关系为

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s} \right)^2 = \left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_r \right)^2 \leq \left(\frac{3X_m}{2X_s} U_s I_{rmax} \right)^2 \quad (6)$$

式中 P_s 、 Q_s 分别为定子有功、无功功率; U_s 为机端电压; X_s 、 X_m 分别为定子漏抗、励磁电抗; I_r 、 I_{rmax} 分别为转子侧电流、转子侧电流最大值。忽略功率变换器与系统损耗,有

$$P_s = \frac{P_{em}}{1-s} \quad (7)$$

$$P_{em} = P_g \quad (8)$$

式中 s 为转差率; P_{em} 为 DFIG 电磁功率; P_g 为 DFIG 输出功率。

由式(6)~(8)可得定子无功功率极限为

$$\begin{cases} Q_{smax} = -\frac{3u_s^2}{2\omega_1 L_s} + \sqrt{\left(\frac{3L_m}{2L_s} u_s I_{rmax} \right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s} \right)^2} \\ Q_{smin} = -\frac{3u_s^2}{2\omega_1 L_s} - \sqrt{\left(\frac{3L_m}{2L_s} u_s I_{rmax} \right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s} \right)^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中 当 DFIG 有功功率输出为 P_g 时, Q_{smax} 、 Q_{smin} 分别为发电机定子可发无功最大、最小值。

网侧变流器的关系为

$$Q_c = \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (10)$$

式中 P_c 、 Q_c 、 S_c 分别为网侧变流器有功输出、无功输出和视在功率。因此,当 DFIG 无功功率不变时,网侧变流器吸收无功功率最大值和最小值将受到网侧变流器额定容量的限制。

网侧变流器吸收的功率(转子吸收的功率)为

$$P_c = s \frac{P_{em}}{1-s} \quad (11)$$

由式(10)、(11)可得网侧变流器无功功率极限为

$$\begin{cases} Q_{cmin} = -\sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s} \right)^2} \\ Q_{cmax} = \sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s} \right)^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中 当 DFIG 有功功率输出为 P_g 时, Q_{cmax} 、 Q_{cmin} 分别为发电机网侧变流器可发无功最大、最小值。

由式(9)、(12)可得:

$$\begin{cases} Q_{gmax} = Q_{smax} - Q_{cmin} \\ Q_{gmin} = Q_{smin} - Q_{cmax} \end{cases} \quad (13)$$

式中 当 DFIG 有功功率输出为 P_g 时, Q_{gmax} 、 Q_{gmin} 分别为发电机网侧变流器可发无功最大、最小值。

3 风电场无功优化模型

该文无功优化的主要目标是降低系统的电压波动以及减少有功损耗、提高电网的稳定性。该文选取无功控制变量为每台 DFIG、风电场 SVC 的无功出力、有载调压变压器分接头位置以及固定电容组数。

3.1 目标函数

1)从安全方面考虑。要求静态电压稳定裕度最高且网络节点电压波动最低,即

$$f(x) = \begin{cases} \max \partial_{min} \\ \min \Delta U \end{cases} \quad (14)$$

式中 ΔU 为节点电压波动; ∂_{min} 为电压稳定裕度。

电压稳定裕度最大为

$$\max \partial_{min} = \max(\min |eig(J)|) \quad (15)$$

式中 J 为系统潮流计算雅克比矩阵。

网络节点电压波动最小为

$$\min \Delta U = \min \sum_{i=1}^n |U_i - U^{spec}| \quad (16)$$

式中 U_i 为除平衡节点以外各节点电压; U^{spec} 为各节点电压期望值。

2)从经济方面考虑。要求风电场网络节点电压波动和风电场网络损耗最小,即

$$f(x) = \begin{cases} \min P_{LOSS} \\ \min \Delta U \end{cases} \quad (17)$$

式中 P_{LOSS} 为风电场网损。

随着电网中风电场容量的持续增长,考虑经济性指标愈发重要,因此,该文重点从经济性角度建立

目标函数。其中,针对电压波动和有功网损指标分别作归一化处理^[17],2个指标权重相同,将节点电压越限作为惩罚项,则目标函数表达式为

$$\min f(\mathbf{X}) = \min \left\{ \frac{P_{\text{LOSS}}}{P_{\text{LOSS}}^0} + \frac{\Delta U}{\Delta U^0} + \alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta U'_i}{U_{i\max} + U_{i\min}} \right)^2 \right\} \quad (18)$$

$$\Delta U'_i = \begin{cases} U_{i\min} - U_i, & U_i < U_{i\min} \\ 0, & U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ U_i - U_{i\max}, & U_i > U_{i\max} \end{cases}$$

式中 $\mathbf{X}$ 为控制变量, $\mathbf{X} = [\mathbf{Q}_{\text{DFIG}}, \mathbf{Q}_{\text{SVC}}, \mathbf{L}_C, \mathbf{T}_{\text{tk}}]$; 为风电场网损; $\mathbf{Q}_{\text{DFIG}}$ 为 DFIG 无功出力向量; $\mathbf{Q}_{\text{SVC}}$ 为 SVC 无功出力向量; $\mathbf{L}_C$ 为电容器组投切组数向量; $\mathbf{T}_{\text{tk}}$ 为有载调压变压器分接头档位向量; P_{LOSS}^0 为补偿前系统网损值; ΔU^0 为补偿前电压波动; α 为节点电压越限惩罚系数,该文取 $\alpha = 3\,000$; $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点电压最高值和最低值。

3.2 约束条件

1) 等式约束条件。

风电场系统潮流方程为

$$\begin{cases} P_i - P_{\text{Di}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i - Q_{\text{Di}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中 P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功、无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 上的有功、无功负荷; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为支路 $i-j$ 的电导和电纳; δ_{ij} 为节点 i 、 j 之间的相角差; U_i 为节点 i 的电压赋值。

2) 不等式约束条件。

控制变量约束条件为

$$Q_{\text{DFIGmin}}(P_{\text{DFIG}}) \leq Q_{\text{DFIG}} \leq Q_{\text{DFIGmax}}(P_{\text{DFIG}}) \quad (20)$$

$$T_{\text{tkmin}} \leq T_{\text{tk}} \leq T_{\text{tkmax}} \quad (21)$$

$$Q_{\text{SVCmin}} \leq Q_{\text{SVC}} \leq Q_{\text{SVCmax}} \quad (22)$$

$$L_{\text{Cmin}} \leq L_C \leq L_{\text{Cmax}} \quad (23)$$

式(20)~(23)中 $Q_{\text{DFIGmax}}(P_{\text{DFIG}})$ 、 $Q_{\text{DFIGmin}}(P_{\text{DFIG}})$ 为 DFIG 输出有功功率为 P_{DFIG} 时的无功上、下限; T_{tkmax} 、 T_{tkmin} 为有载调压变压器的分接头位置的上、下限值; Q_{SVCmax} 、 Q_{SVCmin} 为 SVC 无功上、下限; L_{Cmax} 、 L_{Cmin} 为并联电容器组数上、下限。

状态变量约束条件为

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (24)$$

$$P_{\text{DFIGmin}} \leq P_{\text{DFIG}} \leq P_{\text{DFIGmax}} \quad (25)$$

式(24)、(25)中 $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 为节点 i 电压上、下限; P_{DFIGmax} 、 P_{DFIGmin} 为 DFIG 有功功率上、下限。

4 基于线性递减权重粒子群算法无功优化

风电场控制变量包括每台 DFIG、风电场 SVC 以及固定电容器组的无功输出等,故风电场无功优化涉及到多变量、多约束的非线性无功优化。粒子群优化算法搜索速度快、效率高,优化问题效果较好,且容易收敛于最优解^[18]。线性递减权重粒子群算法(LinWPSO)是一种改进的粒子群算法。LinWPSO 很好地解决了粒子群算法中容易早熟及产生振荡的问题。该文采用 LinWPSO 对风电场进行无功优化,其流程如图 2 所示。

控制变量包括每台 DFIG、风电场 SVC 的无功出力、有载调压变压器分接头位置以及固定电容组数,其中,DFIG 和 SVC 无功输出为连续变量,投切的电容器组数和有载调压变压器分接头档位为离散变量,因此,在计算粒子的函数适应度之前要将其离散化,离散变量的位置采取近似取整的方式处理。

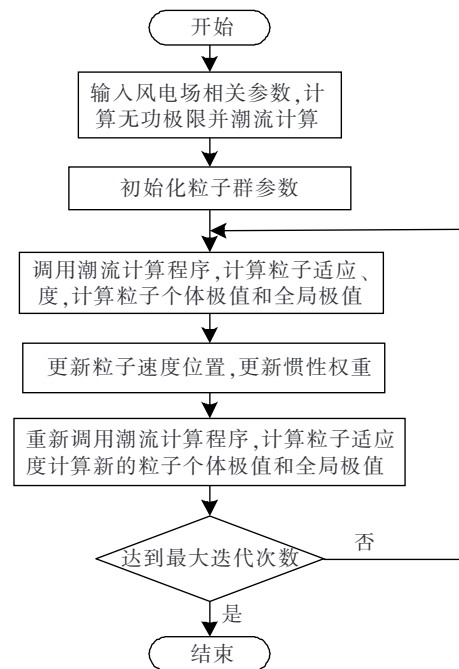


图 2 优化流程

Figure 2 Optimization flow chart

5 算例分析

该文搭建了包含 24 台 2 MW DFIG 的风电场,其结构如图 3 所示。24 台 DFIG 风机组成 8×3 矩阵,同一母线每台 DFIG 间隔 520 m,节点 5、21、37 距离集电系统母线 4 的距离分别为 1、2、3 km。DFIG 所发电能经 690 V/35 kV 变压器接到风电场 35 kV 集电系统母线上。集电系统母线通过一个有载调压变压器(35 kV/110 kV, $U_N\pm 4\times 1.25\%$)连接到电网上。将 35 kV 和 10 MV·A 分别设定为基准电压和基准容量,平衡节点设为 1 节点,其余节点均为 PQ 节点。无功补偿装置包括 2 组 3 MVar 的固定电容器和 1 组 4 MVar 的 SVC^[19]。风电场按照恒功率因数控制模式,功率因数设置为 0.995。根据风电场并网的有功输出计算得出总的无功输出,并将其设置为 4 节点负载。风电场参数如表 1、2 所示。假设每台 DFIG 运行条件相同。

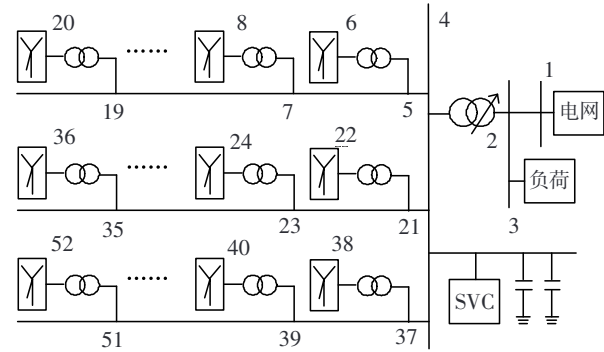


图 3 风电场结构

Figure 3 Layout of grid connected wind farm

表 1 风机间电缆参数

Table 1 The cable parameters between DFIGs				
节点	截面选择/mm ²	R/(Ω /km)	X/(Ω /km)	载流能力/kA
5-7、21-23、37-39	3×240	0.160	0.122 52	0.455
7-9、23-25、39-41	3×150	0.256	0.137 27	0.390
9-11、25-27、41-43	3×120	0.320	0.144 27	0.350
11-13、27-29、43-45	3×95	0.404	0.151 60	0.315
13-15、29-31、45-47	3×70	0.549	0.161 18	0.260
15-17、31-33、47-49	3×50	0.768	0.171 74	0.210
17-19、33-35、49-51	3×50	0.768	0.171 74	0.210

表 2 风电场其他参数

Table 2 The other parameters of wind farm				
电缆(变压器)	R/(Ω /km)	X/(Ω /km)	C/(μ F/km)	载流能力/kA
节点 5、21、37 至节点 4 电缆	0.063 00	0.106 81	0.28	0.726
节点 2 到节点 1 电缆	0.036 79	0.000 38	0.19	0.890
节点 2 到节点 3 电缆	0.019 63	0.000 35	0.26	0.970
690 V/35 kV 变压器	0.025 195+0.222 222i p. u.			
35 kV/110 kV 变压器	0.000 998+0.017 667i p. u.			

LinWPSO 参数:学习因子 $c_1=c_2=2.0$,种群规模 $N=50$,惯性权重 $\omega=0.8$,其中 $\omega_{\max}=0.9$, $\omega_{\min}=0.4$,最大迭代次数 $T=80$,最大速度 $V_{\max}=2$,最小速度 $V_{\min}=-2$ 。

某时刻风电场每台风机有功功率为 1.5 MW;根据功率因数得出无功输出为 3.6 MVar;负荷为 20 MW。根据式(13)可得,每台 DFIG 无功上、下限分别为 0.270 1、-1.824 1 MVar。

针对 3 种情况进行优化:①DFIG 不进行补偿;②DFIG 补偿容量相同;③DFIG 根据拓扑结构分配补偿容量。通过无功优化求解可得优化结果,如表 3 所示,各节点电压幅值对比如图 4 所示,第 3 种情况各 DFIG 无功出力如图 5 所示。

表 3 优化结果对比

Table 3 Comparison of optimization results					
补偿情况	有功网损/MW	总电压偏差/p. u.	电容器组组数	SVC/MVar	变压器分接头位置
DFIG 不进行补偿	0.582	0.252 0	1	1.781 3	$U_N+1.25\%$
DFIG 补偿容量相同	0.580	0.237 9	1	1.504 3	$U_N+1.25\%$
DFIG 按拓扑结构补偿	0.579	0.234 8	1	1.584 9	$U_N+1.25\%$

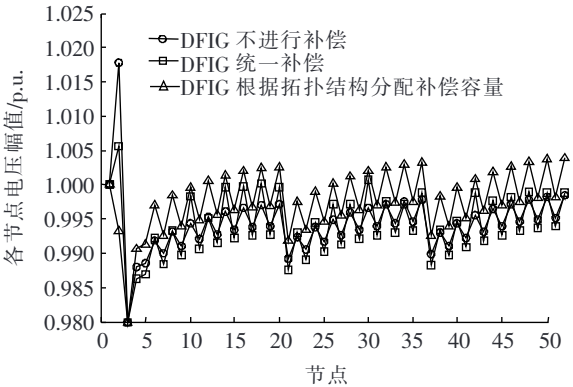


图 4 节点电压对比

Figure 4 Node voltage contrast diagram

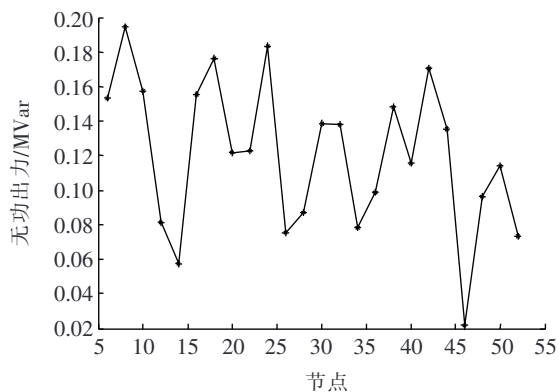


图 5 DFIG 无功出力

Figure 5 Reactive power of DFIG

从优化结果可以得出:

1) 当不考虑 DFIG 无功补偿能力时, 风电场网损及节点电压偏差较大; 考虑其补偿能力后风电场网损及节点电压偏差有一定改善; 考虑风电场 DFIG 拓扑结构后达到最优。

2) 在风电场总体采用恒功率因数控制模式的情况下, 每台 DFIG 无功输出根据风电场中风机所处位置进行分配。

3) 当考虑 DFIG 分散协调控制无功优化时, 风机所发无功由风机位置和电缆参数综合决定。

6 结语

该文分析了 DFIG 无功极限以及风电场电缆选型, 并充分考虑 DFIG 的分散协调控制, 建立了风电场无功优化模型, 目标函数为考虑经济性的风电场总电压偏差和有功网损之和最小, 采用 LinWPSO 进行求解。通过算例分析得出, 充分考虑风电场 DFIG 位置和机间电缆参数的分散协调控制及固定电容器组、SVC、有载调压变压器, 可以有效降低风电场总电压偏差和系统网损, 保证风电场安全经济运行。

参考文献:

[1] 薛尚青, 蔡金锭. 风电场不同控制策略对电网电压稳定影响的分析[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 57-62.
XUE Shangqing, CAI Jinding. Impacts of wind farms with different control strategies on power grids voltage stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(3): 57-62.

[2] 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 Gangui, 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.

[3] 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.

[4] 张永武, 孙爱民, 张源超, 等. 风电场无功补偿容量配置及优化运行[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 150-156.
ZHANG Yongwu, SUN Aimin, ZHANG Yuanchao, et al. Reactive power compensation capacity configuration and optimal operation in wind farm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 150-156.

[5] 谢俊, 王璐, 傅旭华, 等. 考虑风电功率概率分布不确定性的含风电配电网无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 40-47.
XIE Jun, WANG Lu, FU Xuhua, et al. Reactive power planning with consideration of wind power probability distribution uncertainty for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 40-47.

[6] 尹青, 杨洪耕, 马晓阳. 含大规模风电场的电网概率无功优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 514-520.
YIN Qing, YANG Honggeng, MA Xiaoyang. Probabilistic optimal reactive power dispatch of power grid with large-scale wind farm integration[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 514-520.

[7] 段建东, 杨杉. 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[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 123-127+133.
DUAN Jiandong, YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 123-127+133.

- [8] 文立斌,李俊,邓大上,等. 基于电压稳定极限曲面法向量的风电接入配电网随机无功优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):95-100.
- WEN Libin, LI Jun, DENG Dashang, et al. Stochastic reactive power optimization based on normal vector of voltage stability limit surface for distribution network with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):95-100.
- [9] 毛启静. 利用风力发电机的无功功率补偿风电场无功损耗[J]. 电网技术, 2009, 33(19):175-180.
- MAO Qijing. Compensating reactive power loss of wind farm with reactive power generated by wind turbine generators [J]. Power System Technology, 2009, 33(19):175-180.
- [10] 邢作霞,颜宁,肖婉秋,等. 分散式风电场不同时间等级的多目标无功优化控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(11):46-52.
- XING Zuoxia, YAN Ning, XIAO Wanqiu, et al. Multi-timescale multi-objective reactive power optimization of dispersed wind farm[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(11):46-52.
- [11] ZHAO J, LI X, HAO J, et al. Wind farm reactive power output optimization for loss reduction and voltage profile improvements[C]//IEEE Conference on Power Electronics and Motion Control, Wuhan, China, 2009.
- [12] Singh S, Goel N, Kumar P. A novel approach for reactive power output optimization in wind farm for the reduction of distribution losses using genetic algorithm [J]. Electronics and Instrumentation Engineering, 2013, 2(3):1053-1059.
- [13] 范士雄,韩巍,刘幸蔚,等. 计及 VSC 和 DFIG 的电网动态无功优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14):28-36.
- FAN Shixiong, HAN Wei, LIU Xingwei, et al. A dynamic reactive power optimization model considering reactive power support of DFIG and VSC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14):28-36.
- [14] 沈阳武,梁利清,柳永妍,等. 基于内陆分散式风电场有功无功协调调度的最优潮流模型研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(6):19-26.
- SHEN Yangwu, LIANG liqing, LIU Yongyan, et al. Study on optimal power flow model based on distributed wind farms coordinated dispatch of active power and reactive power [J]. Smart Power, 2018, 46(6):19-26.
- [15] 赵利刚,房大中,孔祥玉,等. 综合利用 SVC 和风力发电机的风电场无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2):45-50.
- ZHAO Ligang, FANG Dazhong, KONG Xiangyu, et al. A strategy of reactive power control for wind farm operation using SVC and DFIG [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2):45-50.
- [16] 陈明辉,何祥针,周胜,等. 中低压铜芯电缆经济电流密度的更新与分析[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(1):56-60.
- CHEN Minghui, HE Xiangzhen, ZHOU Shen, et al. Update and analysis of economic current density for medium and low voltage copper cables[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(1):56-60.
- [17] 朱晓伟. 基于改进群搜索算法的风电并网多目标无功优化研究[D]. 上海:上海电机学院, 2016.
- [18] 程虹,杨为群,朱文广,等. 基于改进粒子群算法的交直流系统低压切负荷优化控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4):80-88.
- CHENG Hong, YANG Weiqun, ZHU Wenguang, et al. An optimal control strategy for undervoltage load shedding of AC/DC system based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4):80-88.
- [19] 刘思. 风电场静止无功补偿方案与补偿策略研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.