

基于双馈机组分散协调控制含储能 风电场无功优化研究

随着电网中风电比例的提高，风电场网络损耗及电压波动愈发严重。分析了双馈风力发电机（Doubly Fed Induction Generator, DFIG）无功极限，研究了基于蓄电池和超级电容的混合储能系统在风电场无功优化中的作用。将每台DFIG作为单独连续无功源，以DFIG的无功出力、风电场固定无功补偿器组数、静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC）无功出力及有载调压变压器分接头位置作为控制变量，建立了风电场有功网损和总电压偏差之和最小的目标函数，将风电场无功优化问题转换为一个多变量、多约束的非线性混合优化问题，采用线性递减权重粒子群算法对离散变量进行处理，并寻求无功优化最优解。通过算例对该方法进行验证仿真。

徐 斌 李 珊/国网冀北电力有限公司宽城供电公司

0 引言

随着环境污染和资源匮乏愈发严重，风能作为可再生的清洁能源，其利用开发也愈发重要。随着风电容量不断增加，风电场系统网络损耗随之增加，电压波动也愈发明显，其对电网的影响不可忽视。因此，对以上问题进行优化策略研究。由于风电的波动性，风电场正逐步增加储能系统以稳定输出功率。DFIG具有一定的动态无功调节能力^[1]，其参与风电场内无功优化，将有助于风电场电压控制并降低网络损耗^[2]。

国内外学者对风电场无功优化控制问题进行了深入研究。文献[3]分析了不同类型风电机组风电场静态和动态无功补偿的配置比例及配合方法。文献[4-5]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。文献[6]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。文献[7]考虑风电场内风速变化相关性进行分组与单机预测出力，实现不同时间等级多目标无功优化控制。文献[8]利用电压稳定极限曲面法向量指标对含风电场配电网无功补偿节点进行选址及无功优化。文献[9]结合工程实例分析风电场无功出力对电网电压的影响，并通过计算定量说明利用风力发电机的无功功率可以大幅度减小汇流站无功补偿的容量。文献[10-15]在配电网中考虑了双馈风电机无功调节能力进行无功优化。

上述文献均未充分考虑DFIG拓扑结构及储能系统对无功优化的影响，本文在分析了DFIG无功补偿能力及风电场储能装置的基础上，建立风电场系统网损和电压偏差的目标函数，以DFIG无功出力、固定电容器组数、SVC无功出力和有载调压变压器分接头位置为控制变量，建立数学模型并求解，以某风电场为算例进行仿真验证，验证了其正确性。

1 双馈风力发电机无功极限

DFIG结构图如图1所示，可通过对变流器的控制实现有功和无功的解耦控制，使得DFIG具有动态调节无功的能力^[1]。

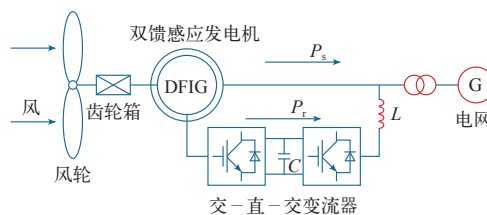


图1 双馈风力发电机结构



徐 斌/高级工程师

关键词/Keywords

双馈式风力发电机 ·
无功极限 ·
储能 ·
无功优化 ·
粒子群算法 ·

DFIG的无功功率分为定子无功功率和网侧变流器无功功率两部分，定子侧功率关系为

$$P_s^2 + \left(Q_s + \frac{3U_s^2}{2X_s} \right)^2 = \left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_r \right)^2 \leq \left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax} \right)^2 \quad (1)$$

式中， P_s 为定子有功功率； Q_s 为定子无功功率； U_s 为机端电压； X_s 为定子漏抗； X_m 为励磁电抗； I_r 为转子侧电流； I_{rmax} 为转子侧电流最大值。

忽略功率变换器与系统损耗，有

$$P_s = \frac{P_{em}}{1-s} \quad (2)$$

$$P_{em} = P_g \quad (3)$$

式中， P_{em} 为机组的电磁功率； P_g 为机组的输出功率； s 为转差率。

由式(1)~式(3)可得定子无功功率极限为

$$\begin{cases} Q_{smin} \leq Q_s \leq Q_{smax} \\ Q_{smax} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} + \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax} \right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s} \right)^2} \\ Q_{smin} = -\frac{3U_s^2}{2X_s} - \sqrt{\left(\frac{3}{2} \frac{X_m}{X_s} U_s I_{rmax} \right)^2 - \left(\frac{P_g}{1-s} \right)^2} \end{cases} \quad (4)$$

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

网侧变流器的关系为

$$Q_c = \sqrt{S_c^2 - P_c^2} \quad (5)$$

式中， P_c 为网侧变流器有功输出； Q_c 为网侧变流器无功输出； S_c 为网侧变流器视在功率。

因此在DFIG所发无功功率一定时，网侧变流器吸收的无功功率最大值与最小值受网侧变流器额定容量限制。网侧变流器吸收的功率（即转子吸收的功率）为

$$P_c = s \frac{P_{em}}{1-s} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可得

$$\begin{cases} Q_{cmin} \leq Q_c \leq Q_{cmax} \\ Q_{cmax} = -\sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s} \right)^2} \\ Q_{cmin} = \sqrt{S_n^2 - \left(\frac{sP_g}{1-s} \right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中， Q_{cmax} 、 Q_{cmin} 分别为DFIG有功功率输出为 P_g 时，网侧变流器可发无功功率最大值和最小值。

由式(4)、式(7)可得

$$\begin{cases} Q_{gmax} = Q_{smax} - Q_{cmax} \\ Q_{gmin} = Q_{smin} - Q_{cmin} \end{cases} \quad (8)$$

式中， Q_{gmax} 、 Q_{gmin} 分别为双馈风电机组在有功功率输出为 P_g 时，DFIG可发无功功率最大值和最小值。

2 风电场混合储能系统

为了根据波动性质合理安排储能方式，将波动功率可分为三种：尖峰波动功率 P_{peak} （由风速瞬间大幅度增大或减少引起）、稳态波动功率 P_{steady} （由风速持续增大或减小引起）和频繁往复性波动功率 P_{recy} （由风速快速往复变化引起）^[16]。本文采用一种有源并联式混合储能系统（Active Paralled Hybrid Energy Storage System, APHESS）进行调节。APHESS系统包括蓄电池组和超级电容器。该系统的结构如图2所示。

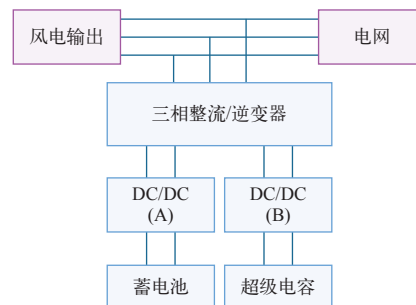


图2 混合储能系统结构

2.1 APHESS总调节功率

根据风电场总的调目标 $P_{standard}$ 及DFIG实时输出功率 P_{real} ，可以得出APHESS输入/输出总功率 P_{whole} 。当 P_{real} 小于 $P_{standard}$ 时，控制发出有功功率为

$$P_{whole} = P_{standard} - P_{real} \quad (9)$$

当 P_{real} 大于 $P_{standard}$ 时，APHESS吸收有功功率为

$$P_{whole} = P_{real} - P_{standard} \quad (10)$$

2.2 APHESS内部的功率分配

APHESS中，超级电容器具有功率密度大、循环寿命长和能量密度低的特点^[16]，用于调节风电场功率波动中的 P_{peak} 及 P_{recy} ；蓄电池具有能量密度

大、循环寿命低的特点^[17]，用于调节风电场功率波动中的 P_{steady} 。

为充分发挥APHESS储能优势。由超级电容器独自承担对 P_{peak} 和 P_{recy} 的平抑。此时APHESS内部的功率分配关系为

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{whole}} \quad (11)$$

$$P_{\text{bat}} = 0 \quad (12)$$

式中， P_{cap} 为超级电容器有功功率； P_{bat} 为蓄电池有功功率。

而当遇到 P_{steady} 时，为稳定端电压，应将蓄电池与超级电容配合，蓄电池在额定电流下充放电，从而调节超级电容器的状态，超级电容器要保持随时应对可能发生的 P_{peak} 和 P_{recy} 的状态。

此时，当蓄电池吸收/发出功率状态与APHESS一致时

$$P_{\text{bat}} = P_{\text{whole}} + P_{\text{cap}} \quad (13)$$

当二者相反时

$$P_{\text{cap}} = P_{\text{whole}} + P_{\text{bat}} \quad (14)$$

3 风电场无功优化模型

风电场无功优化是指当风电场有功负荷、输出功率以及有功潮流已知的前提下，通过优化计算得到风电场中无功控制变量的取值，以找到在满足所有约束条件的前提下，使系统的某一个或多个性能指标达到最优时的运行方式。风电系统无功优化的主要目的是降低系统的有功损耗和电压波动，降低对电网的影响。本文选取无功控制变量为每台DFIG无功出力、固定电容组数、SVC无功出力及有载调压变压器分接头位置。

3.1 目标函数

1) 考虑安全性，一般要求网络节点电压波动最小并且静态电压稳定裕度最大，即

$$f(x) = \begin{cases} \max(\partial_{\min}) \\ \min(\Delta U) \end{cases} \quad (15)$$

式中， $\partial_{\min}$ 为风电场网络的电压稳定裕度； ΔU 为风电场网络节点的电压波动。

电压稳定裕度最大为

$$\max(\partial_{\min}) = \max(\min |\text{eig}(J)|) \quad (16)$$

式中， J 为系统潮流计算雅克比矩阵； $|\text{eig}(J)|$ 为雅克比矩阵的模。

网络节点电压波动最小为

$$\min(\Delta U) = \min \sum_{i=1}^n |U_i - U^{\text{spec}}| \quad (17)$$

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) 考虑经济性，一般要求网络节点电压波动和风电场网络损耗最小，即

$$f(x) = \begin{cases} \min(P_{\text{LOSS}}) \\ \min(\Delta U) \end{cases} \quad (18)$$

式中， P_{LOSS} 为风电场网损。

随着用电负荷的不断增长，经济性的重要性越来越重要，本文主要从经济性角度出发选择目标函数。分别将有功网损和电压波动进行归一化处理^[18]，对节点电压越线以惩罚项加入。有功网损和电压波动重要性相同，不作权重处理。目标函数表达式为

$$\min f(X) = \min \left\{ \frac{P_{\text{LOSS}}}{P_{\text{LOSS}}^0} + \frac{\Delta U}{\Delta U^0} + \alpha \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta U'_i}{U_{i\max} + U_{i\min}} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

$$\begin{cases} U_{i\min} - U_i & U_i \leq U_{i\min} \\ 0 & U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \\ U_i - U_{i\max} & U_i \geq U_{i\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中， X 为目标函数的控制变量， $X = [Q_{\text{DFIG}}, Q_{\text{SVC}}, L_C, T_{\text{tk}}]$ ； Q_{DFIG} 为DFIG无功出力向量； Q_{SVC} 为SVC无功出力向量； L_C 为电容器组投切组数向量； T_{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； $U_{i\max}$ 、 $U_{i\min}$ 分别为节点电压上、下限取值； α 为节点电压越限惩罚系数，取 $\alpha = 3\ 000$ 。

3.2 约束条件

(1) 等式约束条件

风电场系统潮流方程为

$$\begin{cases} P_i - P_{\text{Di}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i - Q_{\text{Di}} = U_i \sum_{j=1}^N U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (21)$$

式中, P_i 、 Q_i 为节点 i 注入的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 为节点 i 上的有功、无功负荷; U_i 为节点 i 的电压赋值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 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。

(2) 等式约束条件

控制变量约束条件为

$$Q_{\text{DFIG-min}}(P_{\text{DFIG}}) \leq Q_{\text{DFIG}} \leq Q_{\text{DFIG-max}}(P_{\text{DFIG}}) \quad (22)$$

$$T_{\text{tk-min}} \leq T_{\text{tk}} \leq T_{\text{tk-max}} \quad (23)$$

$$Q_{\text{SVC-min}} \leq Q_{\text{SVC}} \leq Q_{\text{SVC-max}} \quad (24)$$

$$L_{\text{C-min}} \leq L_{\text{C}} \leq L_{\text{C-max}} \quad (25)$$

式中, $Q_{\text{DFIG-min}}(P_{\text{DFIG}})$ 、 $Q_{\text{DFIG-max}}(P_{\text{DFIG}})$ 为DFIG输出有功功率为 P_{DFIG} 时的无功上、下限; $T_{\text{tk-min}}$ 、 $T_{\text{tk-max}}$ 为有载调压变压器的分接头位置的上、下限值; $Q_{\text{SVC-min}}$ 、 $Q_{\text{SVC-max}}$ 为SVC无功上、下限; $L_{\text{C-min}}$ 、 $L_{\text{C-max}}$ 为并联电容器组数上、下限。

状态变量约束条件为

$$U_{i-\text{min}} \leq U_i \leq U_{i-\text{max}} \quad (26)$$

$$P_{\text{DFIG-min}} \leq P_{\text{DFIG}} \leq P_{\text{DFIG-max}} \quad (27)$$

$$P_{\text{APHESS-min}} \leq P_{\text{APHESS}} \leq P_{\text{APHESS-max}} \quad (28)$$

式中, $U_{i-\text{min}}$ 、 $U_{i-\text{max}}$ 为节点 i 电压上、下限; $P_{\text{DFIG-min}}$ 、 $P_{\text{DFIG-max}}$ 为DFIG有功功率上、下限; $P_{\text{APHESS-min}}$ 、 $P_{\text{APHESS-max}}$ 为APHESS储能上、下限。

4 基于线性递减权重粒子群算法无功优化

风电场包含大量风机, 将每台DFIG无功输出作为控制变量, 加之固定电容器组、SVC无功输出等变量。因此, 风电场无功优化问题是一个多变量、多约束的非线性优化问题。研究表明, 粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization Algorithm, PSO) 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^[19]。线性递减权重粒子群算法 (LinWPSO) 是一种改进的PSO算法, LinWPSO很好地解决了PSO算法中容易早熟及产生振荡的问题。本文采用LinWPSO对风电场进行无功优化。

目标函数中的变量视为粒子中变量的值, 目标函数值视为LinWPSO算法的适应度。这样风电场无功优化问题就转化为目标函数的寻优问题。控制变量包括DFIG无功输出、无功补偿电容器投

运组数、SVC无功输出和有载调压变压器分接头档位。其中, DFIG无功输出和SVC无功输出为连续变量, 有载调压变压器分接头档位和无功补偿电容器组投切组数为离散变量, 因此在计算粒子的函数适应度之前要将其离散化, 离散变量的位置进行近似取整处理。其流程图如图3所示。

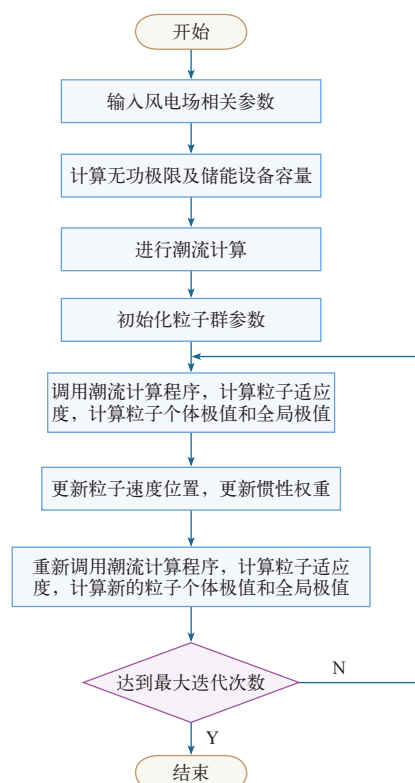


图3 优化流程图

5 算例分析

以某容量为48 MW的风电场为例, 结构图如图4所示。该风电场包含24台2 MW的DFIG, 24台风机组组成矩阵 (每行8台, 共3行), 节点5、节点21和节点37距离集电系统母线4的距离分别为1 km、2 km和3 km, 同一母线每台DFIG间隔520 m。风机所发电能经690 V/35 kV变压器接到风电场35 kV集电系统上。集电系统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。本文以1节点为平衡节点, 其余节点均为PQ节点, 基准电压为35 kV, 基准容量为10 MV·A。无功补偿装置包括两组3 Mvar的固定电容器及一组4 Mvar的SVC^[20]。储能系统调节目标 P_{standard} 以风电场

年平均功率为准, 设置为30 MW^[16]。风电场按照恒功率因数控制模式, 功率因数设置为0.995。根据风电场储能系统调节目标和风电场系统参数计算得出风电场总的无功输出为3 Mvar, 将无功需求设置为4节点负载。为简化计算, 假设每台DFIG具有相同的运行条件。风电场参数如表1所示。

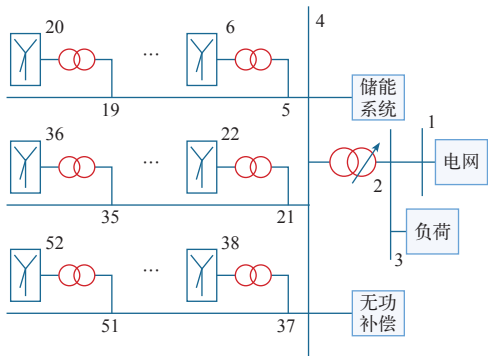


图4 风电场结构图

表1 风电场参数

	$R/(\Omega/\text{km})$	$X/(\Omega/\text{km})$	$C/(\mu\text{F}/\text{km})$	载流能力/kA
机间电缆	0.16	0.122 52	0.19	0.446
节点5、节点21和 节点37至节点4电缆	0.063	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	$0.025\ 195 + 0.222\ 222i$ (pu)			
35 /110 kV变压器	$0.000\ 998 + 0.017\ 667i$ (pu)			

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

5.1 DFIG分散协调控制对风电场无功优化影响

某时刻风电场每台风机有功功率为1.5 MW; 负荷为20 MW。为达到储能系统调节目标, 根据式(10)可得, 储能系统吸收有功功率为6 MW。根据式(8)可得, 此时每台风机无功功率下限为-1.824 1 Mvar, 上限为0.270 1 Mvar。

对比三种情况: ①DFIG不进行补偿; ②DFIG统一补偿; ③DFIG根据拓扑结构分配补偿容量。根据LinWPSO算法对以上三种情况分别进行求解, 无功优化结果如表2所示, 各节点电压幅值情

况如图5所示, 根据拓扑结构进行补偿时各DFIG无功出力如图6所示。

表2 优化结果对比

	DFIG 不进行补偿	DFIG 统一补偿	DFIG 按拓扑结构补偿
有功网损/MW	0.430	0.428	0.427
总电压偏差(pu)	0.329 7	0.288 3	0.192 7
电容器组组数	1	1	1
SVC/Mvar	1.781 3	1.504 3	1.584 9
变压器分接头位置	$U_N+1.25\%$	$U_N+1.25\%$	$U_N+1.25\%$

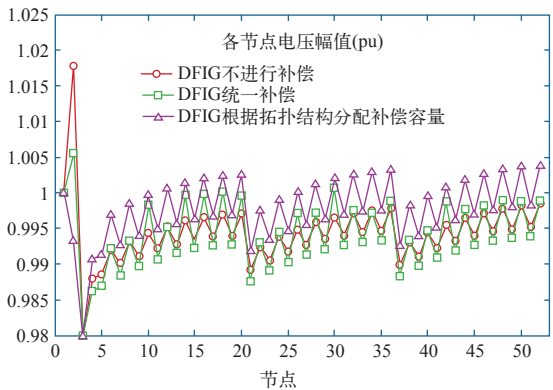


图5 节点电压对比图

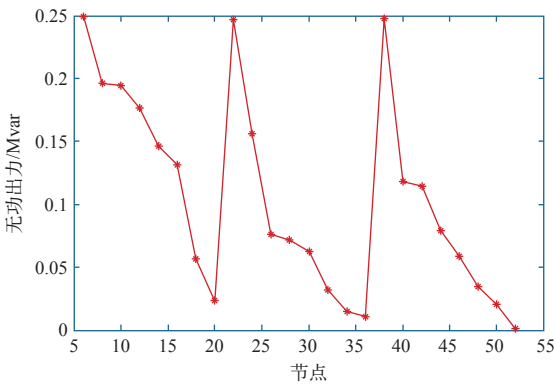


图6 DFIG无功出力

从以上优化结果可以得出:

1) 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) 风电场总体采用恒功率因数控制模式, 在有储能系统的情况下, 风电场总的有功和无功输出保持恒定。但是每台DFIG不宜采用恒功率因数控制模式, 而是根据其拓扑结构进行无功分配。

3) 考虑DFIG分散协调控制进行优化时, 靠近风电场集电母线的DFIG发出的无功功率要多于远离集电母线的DFIG, 风机总的无功功率输出主要依靠靠近风电场集电母线的DFIG进行。

5.2 储能系统对风电场无功优化影响

以一天中A~D时刻为例, 其风电场运行状态如表3所示。

表3 风电场运行状态

	A时刻	B时刻	C时刻	D时刻
DFIG有功功率/MW	2	1.5	1	0.8
DFIG无功极限/Mvar	[-20.15, 0.09] [-1.82, 0.27] [-2.36, 0.60] [-2.5, 0.63]			
负荷/MW	8	20	6	22
APHESS吸收功率/MW	18	6	-6	-10.8

对比以下两种情况: ①风电场有储能系统; ②风电场无储能系统。以A~D时刻为例, 根据LinWPSO算法分别对上述两种情况进行求解, 无功优化结果如表4所示, 各时刻有功网损、总电压偏差如图7、图8所示。

表4 考虑APHESS优化结果对比

	A时刻		B时刻	
有无APHESS	有	无	有	无
电容器组组数	1	1	1	1
SVC/Mvar	1.793 7	1.794 9	1.584 9	0.850 6
变压器分接头	$U_N + 2.5\%$	$U_N + 2.5\%$	$U_N + 2.5\%$	$U_N + 1.25\%$
	C时刻		D时刻	
有无APHESS	有	无	有	无
电容器组组数	0	0	0	1
SVC/Mvar	1.193 4	1.218 1	1.263 2	0.025 4
变压器分接头	$U_N + 1.25\%$	$U_N + 1.25\%$	$U_N + 1.25\%$	$U_N + 3.25\%$

从以上优化结果可以得出, 风电场发出有功功率较高时, APHESS吸收有功功率, 此时有功网损比无APHESS时有所减小, 而电压偏差有所增大; 风电场发出有功功率较低时, APHESS发出有功功率, 此时有功网损比无APHESS时有所增大, 而电压偏差有所减小。从总体上进行分析, APHESS吸收有功功率时, 网损优化明显。因此, 含APHESS的风电场能有效降低网损, 具有更好的

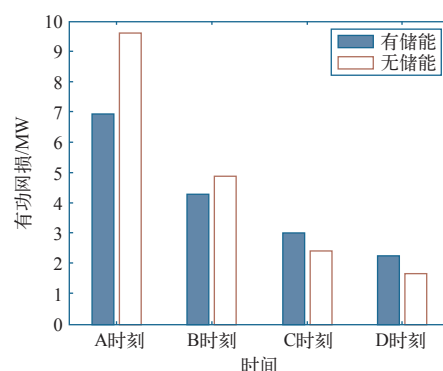


图7 各时刻有功网损

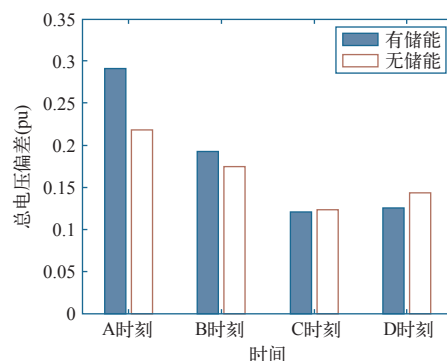


图8 各时刻总电压偏差

经济性。

6 结束语

分析了DFIG无功极限以及风电场混合储能系统, 充分考虑DFIG分散协调控制, 以风电场有功网损和总电压偏差之和最小为目标函数建立无功优化模型, 运用LinWPSO对算例进行优化求解。算例结果表明, 在含储能系统的风电场中, 根据DFIG分散协调控制进行无功输出分配, 同时充分利用储能系统、固定电容器组、SVC及有载调压变压器, 有效降低了系统网损和总电压偏差, 提高了风电场电压合格率, 保证了风电场系统安全经济运行。

参考文献

- [1] 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.
- [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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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.
- [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.
- [10] 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.
- [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: 1099-1103.
- [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] 闫鹏强, 王增平, 陈振新, 等. 考虑拓扑影响的风电场无功优化策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44 (11): 76-82.
- [14] 符杨, 潘翔龙, 黄玲玲. 考虑双馈机组无功调节能力的海上风电场无功优化 [J]. 电网技术, 2014, 38 (8): 2168-2173.
- [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.
- [16] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (24): 35-40.
- [17] 王菊芬, 李宜富, 杨海平, 等. 光伏发电系统中影响蓄电池寿命因素分析 [J]. 蓄电池, 2002 (2): 51-54.
- [18] 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.
- [19] 李鸿鑫, 李银红, 李智欢. 多目标进化算法求解无功优化问题的比较与评估 [J]. 电网技术, 2013, 37 (6): 1651-1658.
- [20] 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.
- (收稿日期: 2017-12-10) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告