

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.03.008

# 基于 STATCOM 的风电并网系统阻尼特性 优化控制设计

周宇健<sup>1</sup>, 匡洪海<sup>1</sup>, 钟浩<sup>2</sup>, 高闰国<sup>1</sup>, 郭茜<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对当前风电场并网的暂态稳定性问题, 在静止同步补偿器 (STATCOM) 的基本结构和数学模型的基础上, 设计了一种含有灰狼优化算法 (GWO) 的功率振荡阻尼控制器, 并利用 GWO 算法优化控制器参数来提高系统的暂态稳定性; 最后, 利用 Matlab/Simulink 对系统进行了建模仿真分析, 对三相接地短路工况下运行的波形进行研究。结果表明, 引入的 STATCOM 阻尼效果较好, 振荡被有效地抑制, 在一定程度上改善了风电并网系统的电能质量问题。

**关键词:** 静止同步补偿器; 灰狼优化算法; 功率振荡阻尼器; 风电场

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2021)03-0055-07

**引文格式:** 周宇健, 匡洪海, 钟浩, 等. 基于 STATCOM 的风电并网系统阻尼特性优化控制设计 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(3): 55-61.

## STATCOM-Based Optimization Control Design of Damping Characteristics of Wind Power Grid Connected System

ZHOU Yujian<sup>1</sup>, KUANG Honghai<sup>1</sup>, ZHONG Hao<sup>2</sup>, GAO Runguo<sup>1</sup>, GUO Qian<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Hubei Key Laboratory of Operation and Control of Cascade Hydropower Stations, China Three Gorges University, Yichang Hubei 443002, China)

**Abstract:** In view of the transient stability of wind farm grid connection, based on the basic structure and mathematical model of static synchronous compensator (STATCOM), a power oscillation damping controller with gray wolf optimization algorithm (GWO) has thus been designed, with the parameters of the controller optimized by GWO algorithm to improve the transient stability of the system. Finally, a modeling and simulation analysis is to be carried out of the system by using Matlab/Simulink. Based on the the research on the operation waveform under three-phase grounding short-circuit condition, the results show that the STATCOM damping effect is great, with the oscillation effectively suppressed, and the power quality problem of the wind power grid connected system improved to a certain extent as well.

**收稿日期:** 2020-09-22

**基金项目:** 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ4076); 湖北省重点实验室开放基金资助项目 (2019KJX06)

**作者简介:** 周宇健 (1996-), 男, 浙江永康人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为新能源发电与并网,

E-mail: zhouyujian96@163.com

**通信作者:** 匡洪海 (1972-), 女, 湖南双峰人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事分布式发电技术和配电网停电技术方面的教学与研究, E-mail: 342113970@qq.com

**Keywords:** static synchronous compensator (STATCOM); gray wolf optimization algorithm; power oscillation damping; wind farm

## 1 研究背景

近年来,随着环境问题的日益严峻,以及煤炭和石油等不可再生资源的逐渐消耗,利用太阳能、风能、地热能、潮汐能等各类分布式清洁能源的分布式发电(distributed generation, DG)技术已经成为热门课题之一,尤其是以风电为代表的分布式发电技术得到了许多学者的重视。但是由于风电等分布式发电受自然条件的影响较为明显,这些可再生能源的“间歇性”特点会对电力系统的稳定性和电能质量造成不利的影 响,所以需要对其并网技术进行研究<sup>[1-2]</sup>。静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),作为近年来风电场热门的无功补偿装置,类似于静态无功补偿器,它是一种并联型的柔性交流输电(flexible alternative current transmission systems, FACTS)设备,同传统的静止无功补偿器(static var compensator, SVC)相比,其体积较小、调节速度较快,运行范围较宽,性能上有极大的优越性<sup>[3]</sup>。STATCOM通过电压源转换器进行电压调节,可以快速地控制电压幅值和精确控制相位角,具有改善系统阻尼以及系统电压分布的特性,在增强系统阻尼并且抑制系统区域间振荡中起着关键的作用<sup>[4]</sup>。

文献[5]对不同风机模型进行了比较分析,并通过采用静止同步补偿器 STATCOM 控制来解决双馈风力发电场并入系统稳定性的问题,仿真结果表明,当系统受到大扰动时,STATCOM 能有效地使转子转速和并网处电压快速地恢复正常;文献[6]对不同风电场动态模型进行研究,分析风电场并入系统引发的电力系统低频振荡、次同步振荡和超同步振荡问题,研究表明,大规模风电并网的增加会使区域间的阻尼大大减弱,给电力系统的稳定性带来巨大的挑战。文献[7]提出基于粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)的 SVC 附加阻尼控制器参数优化设计,结果表明,当系统受到大扰动时,所设计的 SVC 附加阻尼控制器能够很好地对故障所引起的功率和电压振荡起到阻尼作用,提高系统的稳定性。但 SVC 相比 STATCOM,其采用的是半控型器件,当系统电压下降时,无功控制能力会减弱,受系统电压影响较大,电压支撑能力弱于 STATCOM。文献

[8]提出了基于灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)的静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)阻尼功率振荡控制器设计,在分析了 SSSC 和阻尼控制器的原理后,利用 GWO 算法优化控制器参数,结果表明,优化后的控制器起到了良好的阻尼作用,更快地使系统恢复稳定,且功率波动幅度较小。

基于以上研究,本文以 STATCOM 的基本工作原理与数学模型为基础,设计了以本地测量信号作为控制器输入信号时的阻尼控制的设计方案,进而结合具有寻优功能的灰狼优化算法确定阻尼控制器的优化控制参数来提高系统的稳定性,并利用 Matlab/Simulink 搭建含有 STATCOM 的风电并网系统模型,验证所提方案的有效性。

## 2 STATCOM 基本原理与数学模型

STATCOM 作为 FACTS 设备中的一员,是当今应用较多的电力电子技术。相对于 SVC 而言,STATCOM 具有更好的暂态电压调节能力和动态无功支撑能力,能为系统提供瞬时无功功率<sup>[9]</sup>。从主电路组成单元的拓扑结构上,将 STATCOM 分为电压型桥式结构和电流型桥式结构。其中直流侧采用电容的为电压源型逆变器,采用电感的为电流源型逆变器。由于电压源型逆变器的储能电容损耗要小得多,因此本文主要研究基于电压源型逆变电路的 STATCOM。电压源型 STATCOM 实际上是一个自换相的电压型三相全波桥式逆变器,接入系统可进行无功功率的补偿,从而可提高电力系统的稳定性,其简化后的接线图如图 1 所示。

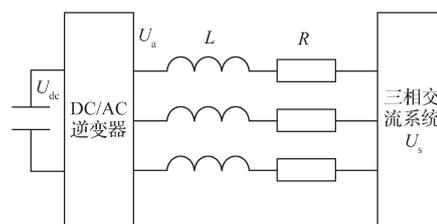


图 1 电压源型 STATCOM 简化接线图

Fig. 1 Simplified wiring diagram of voltage source STATCOM

STATCOM 的工作原理: STATCOM 在系统中可等效成一个可调电压源,通过电感和电阻或者直接

通过电感并联在交流系统上, 由可关断晶闸管 (gate turn-off thyristor, GTO) 的通断将  $U_{dc}$  逆变成与电网同频率的相位裕幅值都可控制的交流电压, 从而达到无功补偿的目的<sup>[10]</sup>。

图1中有功功率和无功功率的计算公式分别为

$$P = -\frac{U_a U_s}{X} \sin \delta, \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_a U_s \cos \delta - U_s^2}{X}. \quad (2)$$

式中:  $P$  为有功功率;

$Q$  为无功功率;

$X$  为电抗;

$U_s$  为系统电压瞬时有效值;

$U_a$  为 STATCOM 输出电压;

$\delta$  为同步信号采样点系统静止无功补偿器输出电压的夹角。

一般地, 把  $\sin \delta$  作近似等于 0 处理, 则  $\cos \delta$  可以近似为 1。把  $\sin \delta=0$  代入式 (1) 中, 可得  $P=0$ ;

把  $\cos \delta=1$  代入式 (2) 中, 可得:

$$Q = \frac{(U_a - U_s) U_s}{X}. \quad (3)$$

由式 (3) 可以得知, 当  $U_a < U_s$  时, 静止同步补偿器从系统吸收感性无功功率, 其工作区域为感性; 当  $U_a > U_s$  时, 静止同步补偿器向系统输出感性无功功率, 其工作区域为容性; 当  $U_a = U_s$  时, 静止同步补偿器不与系统交换无功功率。故通过控制电压大小就可以实现静止同步补偿器与电网之间无功功率的快速连续调节。

为了便于理论分析的计算, 课题组在研究 STATCOM 数学模型时, 采用输入输出的建模方法, 且输出电压仅考虑基波分量和非周期分量。其数学模型在  $dq$  坐标系下的公式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{K}{L} \sin \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{K}{L} \cos \delta \\ \frac{3K}{2C} \sin \delta & \frac{3K}{2C} \cos \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2} U_s \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

式中:  $K$  为增益比例;

$\omega$  为角频率;

$C$  为电容;

$L$  为线路和变压器的等效电感;

$R$  为装置所有损耗等效电阻;

$i_d$ 、 $i_q$  分别为  $dq$  坐标系下 STATCOM 吸收的有功电流和无功电流;

$u_{dc}$  为 STATCOM 直流侧电压。

### 3 基于 STATCOM 的阻尼控制器模型

近年来, 以 STATCOM 为代表的 FACTS 装置逐渐被应用于改善电力系统的振荡稳定性<sup>[11]</sup>。STATCOM 双闭环控制系统如图 2 所示。

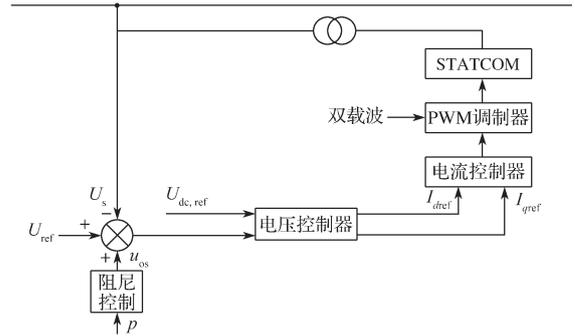


图 2 STATCOM 双闭环控制系统图

Fig. 2 Control diagram of STATCOM

为研究 STATCOM 附加阻尼控制作用对风电场暂态稳定性的作用, 课题组研究 STATCOM 所使用的无功补偿策略, 是工程上常用的电压-电流双闭环控制方法, 其中电压外环用于调整并网点电压和 STATCOM 的直流电容电压, 它的输出电压作为电网电流的给定值, 内部的电流控制回路产生  $dq$  电压分量, 并作用于脉冲宽度调制器发出脉冲, 进而控制 STATCOM<sup>[12]</sup>。

STATCOM 附加阻尼控制通过引入反映系统振荡的变量来增加系统阻尼, 选择合适的附加信号是提高阻尼效果的前提。基于 STATCOM 的风电场附加阻尼抑制策略的输入信号有角频率误差、风电场出口电压、有功功率等<sup>[13]</sup>。由于风能的间歇性, 转子角速度随风速不断变化, 故课题组选取 STATCOM 并入点处本地信号有功功率作为 STATCOM 阻尼控制器的输入信号。阻尼控制器的传递函数为

$$H(s) = K_s \frac{sT_w}{1+sT_w} \cdot \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \cdot \frac{1+sT_3}{1+sT_4}. \quad (5)$$

式中:  $T_w$  为滤波器时间常数参数, 根据系统的稳定性和根轨迹,  $T_w$  的取值范围一般为 1~20 s, 本文取  $T_w=3$  s;

$s$  为复频率;

$T_1 \sim T_4$  为超前滞后环节的时间常数;

$K_s$  为系统增益系数。

阻尼控制器的结构图见图 3。

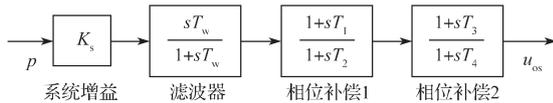


图3 STATCOM 阻尼控制器结构图

Fig. 3 Structure diagram of STATCOM damping controller

如图3所示,首先 $p$ 通过增益环节放大。然后,通过滤波器的隔直环节;最后,通过相位补偿模块,即2级超前滞后环节,进行相位补偿,输出信号 $u_{os}$ 作为电压比较环节的附加信号,并最终被调制生成STATCOM的 $I_{qref}$ 。

## 4 基于灰狼优化算法的控制器设计

近年来,随着优化理论的发展,群体智能算法在系统优化领域掀起了研究热流。在2014年,灰狼优化算法(GWO)被提出,研究人员受到灰狼捕食猎物活动的启发,开发了一种模拟野生狼群社会性等级结构,该算法是一种仿照狼群捕猎行为的群体智能优化算法<sup>[14]</sup>。由于它具有收敛性强、参数较少等特点,近年来受到了广泛的研究,在参数优化、图像分类等领域中取得了一定成果<sup>[15]</sup>。此算法将种群严格划分为4个社会等级层次,种群中的个体代表了优化问题的解。 $\alpha$ 狼为种群领导者(全局最优解),等级最高; $\beta$ 狼(次优解)充当桥梁的作用,主要负责协助 $\alpha$ 狼进行决策,地位仅次于 $\alpha$ 狼,当整个狼群的 $\alpha$ 狼死去, $\beta$ 狼将接替 $\alpha$ 狼的位置。 $\beta$ 狼会接收 $\alpha$ 狼的指令,并由它担任通知狼群其他成员的任务,狼群其他成员行动后会将信息反馈给 $\beta$ 狼,再由 $\beta$ 狼反馈给 $\alpha$ 狼;第三优解为 $\delta$ 狼, $\delta$ 狼必须服从 $\alpha$ 狼和 $\beta$ 狼;剩下为 $\omega$ 狼(候选解),其等级最低,主要负责种群内部关系的平衡<sup>[16]</sup>。灰狼优化算法的寻优过程就是由高等级狼指导低等级狼搜索目标的过程。

通过GWO算法优化控制器参数,利用算法实现最优解问题,首先需要将控制器参数的调节任务用目标函数来表示一个最优问题。设目标函数为

$$\min f = \int_0^t \Delta P dt \quad (6)$$

式中: $\Delta P$ 为功率偏差;

$t$ 为运行时间。

故目的是求取目标函数的最小化。 $T_w$ 的取值前文已经给出,式(6)的目标函数还受到以下条件的约束:

$$\begin{aligned} K_s^{\min} &\leq K_s \leq K_s^{\max}, \\ T_1^{\min} &\leq T_1 \leq T_1^{\max}, \\ T_2^{\min} &\leq T_2 \leq T_2^{\max}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3^{\min} &\leq T_3 \leq T_3^{\max}, \\ T_4^{\min} &\leq T_4 \leq T_4^{\max}. \end{aligned}$$

GWO算法的基本步骤大致可以分为如下4个阶段。

1) 初始化GWO算法。初始化搜索因子数目(狼群规模) $S=25$ 以及系数向量 $A$ 、 $C$ 和 $a$ ,初始化迭代次数 $t=1$ ,并令 $t=t+1$ ,同时设置最大迭代次数 $n=50$ 。

2) 包围阶段。灰狼对猎物的围捕进行定义:

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)|, \quad (7)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D, \quad (8)$$

$$A = 2ar_1 - a, \quad (9)$$

$$C = 2r_2. \quad (10)$$

式(7)~(10)中: $D$ 为灰狼个体与猎物之间的距离;

$X$ 为当前灰狼的位置;

$X_p$ 为猎物当前的位置;

$r_1$ 和 $r_2$ 为模在0~1范围内的随机向量。

式(8)为灰狼位置的更新公式。向量 $A$ 、 $C$ 由式(9)和式(10)得出。

3) 狩猎阶段。由于猎物位置(最优解)是未知的,为了模拟狩猎过程,且为了使 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼更了解猎物位置,在 $t$ 次迭代中,每次迭代的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼可由 $D$ 来判断得出 $X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 、 $X_\delta$ ,从而强迫其他灰狼更新自己的位置来,逐渐靠近猎物。其数学模型为

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X|, \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X|, \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X|. \end{cases} \quad (11)$$

式中: $D_\alpha$ 、 $D_\beta$ 、 $D_\delta$ 分别为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼与其他个体间的距离;

$X_\alpha$ 、 $X_\beta$ 、 $X_\delta$ 分别为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\delta$ 狼的当前位置;

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 为随机向量<sup>[17]</sup>。

通过计算各灰狼与猎物之间的距离,利用式(12)优化更新灰狼的位置。

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha, \\ X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta, \\ X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta. \end{cases} \quad (13)$$

式(12)的 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 可由式(13)得出。

4) 攻击猎物阶段。狼群通过不断更新自己的位置来逼近猎物,最后对猎物发起进攻,即迭代次数达到最大迭代次数50时终止,输出最优解。

### 5 仿真验证

课题组在 Matlab/Simulink 软件仿真平台上搭建了含有风电场和静止同步补偿器装置的电力系统, 并以此系统验证本研究所给出方法的有效性, 该系统的简化模型如图 4 所示。风电场的风机装机容量为 9 MW, 设置恒定风速为 15 m/s, 风电场发出的电能首先经过变压器升高到 25 kV, 然后经过 30 km 的输电线路, 线路参数如下: 单位长度电阻为 0.375 Ω/km; 单位长度电感为  $2.05 \times 10^{-3}$  H/km, 单位长度电容为  $10.55 \times 10^{-9}$  F/km; 再经过 120 kV 的变压器, 升高为 120 kV 电压等级的高压电后并入电网系统。本文中的 STATCOM 安装在母线 4 处, 发生短路的故障处靠近母线 3 处。

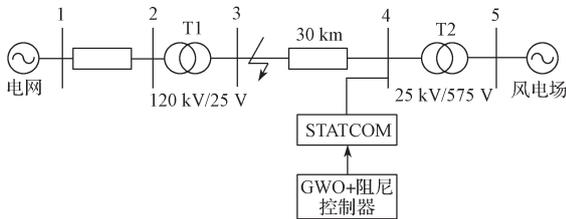


图 4 含 STATCOM 和风电场的系统简化模型

Fig. 4 Simplified model of the system with STATCOM and wind farm

为了研究经灰狼优化算法优化的阻尼控制器控制的 STATCOM 对风电并网系统稳定性的影响, 现设计三相短路接地的工况, 设于 1 s 时在靠近母线 3 的线路上发生三相短路接地故障, 0.1 s 后故障切除。下面分别对传统控制下的系统和经灰狼优化算法优化后阻尼控制器下的系统在受到大扰动短路故障时的暂态稳定性进行分析。图 5 和图 6 分别为故障后传统控制下 STATCOM 并入系统时和经 GWO 算法优化后控制器下的 STATCOM 并入系统时, 母线 4 处的电压变化情况。

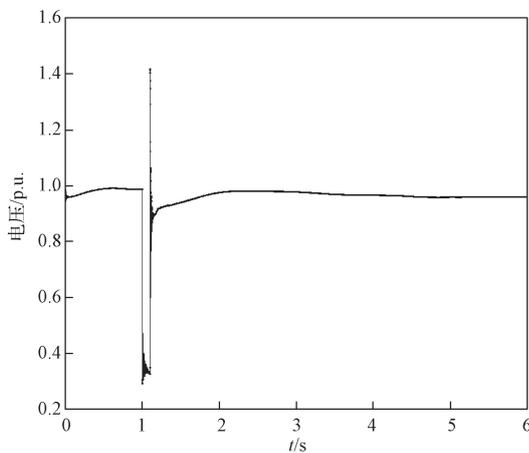


图 5 传统控制下的系统母线 4 处电压曲线

Fig. 5 Voltage at bus 4 of the system under traditional control

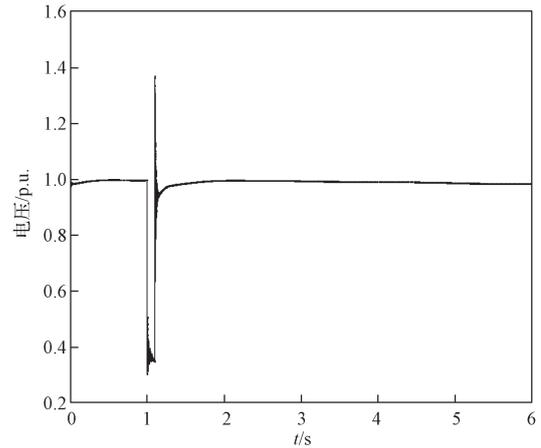


图 6 经优化后系统母线 4 处电压曲线

Fig. 6 Voltage at bus 4 of the system after optimization

从仿真图 5 和 6 可以看出, 在故障切除后, 传统的控制器下系统母线 4 处电压于 2.1 s 左右才逐渐趋于一个稳态值, 并最终稳定在 0.971 p.u. 附近; 而采用 GWO 算法优化后, STATCOM 在提供阻尼的同时有效地减少了对电压控制的干扰, 电压于 1.4 s 时趋于稳定, 最终稳定在 0.980 p.u. 附近, 较传统控制器电压更快地恢复稳定, 可见系统的电压质量得到了改善。

图 7 和图 8 分别为传统控制下和优化后风电并网处有功功率变化曲线。由图 7 和图 8 可知, 当系统发生大扰动后, 传统控制下系统风电并网处有功功率振荡明显, 初始最大振荡幅值可达 1.31 p.u., 约 4 s 时才趋于稳定。经 GWO 算法优化后的系统有功功率初始最大振荡幅值为 1.27 p.u., 并于 3 s 左右逐渐趋于稳定, 与未优化前相比更早到达稳态且振幅较小。相比传统控制器, 经 GWO 算法优化设计的 STATCOM 附加阻尼控制器可以更好地改善系统阻尼, 抑制系统功率振荡, 使功率的波动情况得到改善。

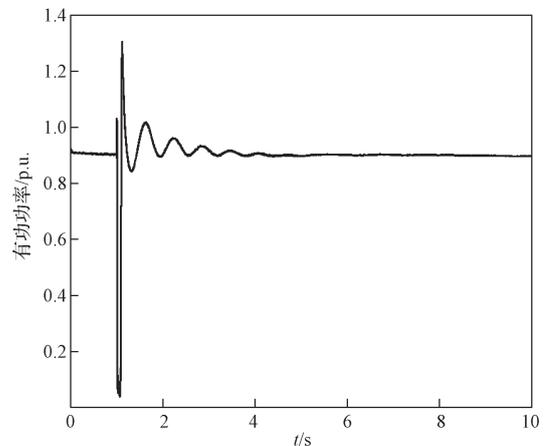


图 7 传统控制下的风电并网处有功功率曲线

Fig. 7 Active power of wind power grid connection under traditional control

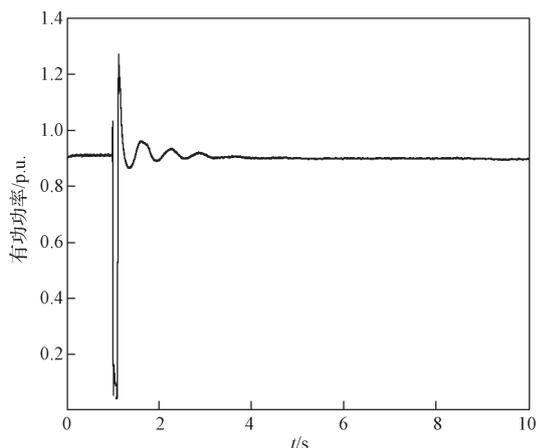


图8 优化后风电并网处有功功率曲线

Fig. 8 Wind power grid at the active power after optimization

## 6 结语

本文提出了一种基于 STATCOM 提高系统阻尼特性的控制策略优化设计方案,并在 Matlab/Simulink 下建立基于 STATCOM<sup>[18-19]</sup> 的风电场模型进行验证,通过在最严重的三相接地短路故障情况下,分别对比系统优化前和优化后的母线 4 处的电压和并网处有功功率的波动情况,可知本研究中所设计的方案下的系统能够更快地恢复稳态,并且改善了电压和功率波动的情况,减少了系统振荡。本文虽然针对 STATCOM 的控制器进行优化设计,从而改善了系统的稳定性,但是由于运行方式的改变有可能影响阻尼控制的配置点,因此,进一步考虑系统的实时性是未来的研究方向之一。

### 参考文献:

- [1] 匡洪海, 吴政球, 何小宁, 等. 提高多机风力发电并网系统稳定性的研究 [J]. 热能动力工程, 2011, 26(2): 238-243, 258.  
KUANG Honghai, WU Zhengqiu, HE Xiaoning, et al. Study on Enhancement of the Stability of a Multiple Wind Turbine Power Generation and Grid Connection System[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(2): 238-243, 258.
- [2] 宋方方, 贾秀芳, 赵成勇, 等. SSSC 提高系统阻尼特性的控制策略优化设计 [J]. 电网技术, 2017, 41(3): 881-889.  
SONG Fangfang, JIA Xiufang, ZHAO Chengyong, et al. An Optimized SSSC Control Strategy for Improving System Damping Characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 881-889.
- [3] DARABIAN M, JALILVAND A. Improving Power System Stability in the Presence of Wind Farms Using STATCOM and Predictive Control Strategy[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(1): 98-111.
- [4] 蔡卫江, 李雪峰, 赵士正. 基于 STATCOM 的功率振荡阻尼器和 PSS 控制器协调控制研究 [J]. 中国工程机械学报, 2020, 18(1): 34-39.  
CAI Weijiang, LI Xuefeng, ZHAO Shizheng. Coordinated Control of POD and PSS Controllers with STATCOM to Improve Oscillation Stability of Single and Multi-Machine Power Systems[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2020, 18(1): 34-39.
- [5] 张曙云, 王重. STATCOM 对大型双馈风电并网系统稳定性改善的研究 [J]. 电工技术, 2018(10): 77-79, 82.  
ZHANG Shuyun, WANG Chong. Research on Stability Improvement of Large Doubly-Fed Wind Power Grid Connected System by STATCOM[J]. Electric Engineering, 2018(10): 77-79, 82.
- [6] 董文凯, 杜文娟, 王海风. 用于振荡稳定性分析的并网风电场动态等效模型 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 75-87.  
DONG Wenkai, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Dynamic Equivalent Model of a Grid-Connected Wind Farm for Oscillation Stability Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 75-87.
- [7] 孙勇. 电力系统附加阻尼控制器的优化配置与设计方法研究 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2009.  
SUN Yong. Research on Optimizing Allocation and Design Methods for Auxiliary Damping Controllers of Power Systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [8] 马永翔, 陈昊睿, 闫群民, 等. 基于灰狼优化算法的 SSSC 阻尼功率振荡控制器设计 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(3): 1-6.  
MA Yongxiang, CHEN Haorui, YAN Qunmin, et al. Design of SSSC Damping Power Oscillation Controller Based on Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(3): 1-6.
- [9] LI G X, CHEN Y D, LUO A, et al. An Enhancing Grid Stiffness Control Strategy of STATCOM/BESS for Damping Sub-Synchronous Resonance in Wind Farm Connected to Weak Grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(9): 5835-5845.
- [10] DIPESH K, SHUKLA Dr S P. Improvement of Voltage Stability of Distributed Generation by Using SVC and STATCOM Through Reactive Power Compensation[J]. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2019, 11(2): 241-248.
- [11] 李圣清, 杨潇. 改进的级联 STATCOM 直流侧均压控制策略 [J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(3): 13-

17.  
LI Shengqing, YANG Xiao. An Improved STATCOM DC Side Voltage Control Strategy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(3): 13-17.
- [12] 郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 等. TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 90-95.  
ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, et al. Voltage Stability Improvement of Wind Power Integrated System Using TCSC-STATCOM Control[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 90-95.
- [13] 王玉芝, 王 亮, 姜齐荣. 基于 STATCOM 的风电场 SSCI 附加阻尼抑制策略 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 49-59.  
WANG Yuzhi, WANG Liang, JIANG Qirong. STATCOM Based Supplementary Damping Mitigation Strategy for Subsynchronous Control Interaction in Wind Farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 49-59.
- [14] 赵洛印, 李忠诚, 王 丹, 等. 基于 GWO-SVM 的电压暂降扰动源识别 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(23): 76-85.  
ZHAO Luoyin, LI Zhongcheng, WANG Dan, et al. Identification of Voltage Sag Disturbance Sources Based on GWO-SVM Full Text Replacement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(23): 76-85.
- [15] DJEMA M A, BOUDOUR M, AGBOSSOU K, et al. Adaptive Direct Power Control Based on ANN-GWO for Grid Interactive Renewable Energy Systems with an Improved Synchronization Technique[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(3): e2766.
- [16] 龙 文, 蔡绍洪, 焦建军, 等. 一种改进的灰狼优化算法 [J]. 电子学报, 2019, 47(1): 169-175.  
LONG Wen, CAI Shaohong, JIAO Jianjun, et al. An Improved Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(1): 169-175.
- [17] 张晓凤, 王秀英. 灰狼优化算法研究综述 [J]. 计算机科学, 2019, 46(3): 30-38.  
ZHANG Xiaofeng, WANG Xiuying. Comprehensive Review of Grey Wolf Optimization Algorithm[J]. Computer Science, 2019, 46(3): 30-38.
- [18] 黄炎光, 许崇福, 马智远, 等. 电网不平衡情况下级联星接 STATCOM 的控制策略 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 135-141.  
HUANG Yanguang, XU Chongfu, MA Zhiyuan, et al. Control Strategy of Cascade Y-STATCOM Under Imbalanced Grid Conditions[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 135-141.
- [19] 马燕峰, 刘会强, 俞人楠, 风电场中 STATCOM 抑制系统功率振荡 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 67-73.  
MA Yanfeng, LIU Huiqiang, YU Rennan. Power Oscillation Suppression Based on STATCOM in Wind Farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 67-73.

(责任编辑: 申 剑)