

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.017

适应可再生能源分布式发电的 D-STATCOM 容量配置研究*

杨雨瑶¹, 张勇军¹, 黄向敏²

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市奔流电力科技有限公司, 广东 广州 510640)

摘要:针对可再生能源发电以分布式接入的方式并网的不可控性和其出力的间歇性,给电网带来的电压扰动越限等诸多问题,提出了一种适应可再生能源发电接入配电网的 D-STATCOM 容量配置方法。该方法基于可再生能源发电接入后的电压波动机理和线路特征参数的灵敏度分析,以抑制可再生能源发电造成的最大电压波动为目的,总结出了在数据缺省情况下的 D-STATCOM 容量配置推荐范围,并通过统一目标的多元线性回归拟合得到了 D-STATCOM 的容量配置推荐公式。以多条实际的城镇和农村配电网线路作为算例,验证了所提方法的有效性。研究表明,该方法可以通过对 D-STATCOM 的容量进行合理配置来抑制可再生能源发电接入产生的电压波动。

关键词:配电网;可再生能源;D-STATCOM;无功配置;电压波动

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0298-06

Capacity allocation of D-STATCOM adapting to renewable energy generation in distribution networks

YANG Yu-yao¹, ZHANG Yong-jun¹, HUANG Xiang-min²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Guangzhou BENLIU Electrical Technology Co., Ltd., Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the problems such as voltage fluctuation that result from the uncontrollability and randomness of renewable energy which was connected to electric power grids by means of distributed generation, a capacity allocation method of D-STATCOM adapting to renewable energy generation was proposed in this paper. This method was based upon the mechanism analysis of voltage drop and sensitivity analysis of distribution feeder parameters and targeted at preventing the maximum voltage fluctuation. The recommended range of capacity allocation was summarized in the case of lack of data and a capacity allocation formula of D-STATCOM was achieved through unified-objective multiple-linear regression. Taking the actual urban and rural distribution feeders as examples, the results of simulation indicate that the proposed method is effective and it can calculate the reasonable capacity of D-STATCOM which can exactly prevent the maximum voltage fluctuation produces by renewable energy generation.

Key words: distribution network; renewable energy; distribution-static synchronous compensator(D-STATCOM); reactive capacity allocation; voltage fluctuation

0 引言

可再生能源以分布式发电(distributed generation,

DG)的方式接入配电网已经成为当前电力行业发展的重要途径和必然趋势。受地域和天气等因素的制约影响,可再生能源发电(renewable energy generation,

收稿日期:2016-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377060)

作者简介:杨雨瑶(1993-),女,福建邵武人,硕士研究生,主要从事电力系统运行和控制方面的研究. E-mail: cassieyang93@qq.com

REG) 的出力具有随机性、间歇性和不确定性的特点,给电力系统的运行带来了很大的挑战,其中一个重要影响是劣化电能质量,造成电压频繁波动越限,损坏设备寿命和威胁配电网的安全。除了合理规划、严格限制 REG 的接入容量之外,通过增加额外设备对配电系统进行动态的有功/无功供需平衡,也是解决 REG 接入问题的重要措施^[1]。

由于目前储能造价昂贵,且电容器的响应速度和调节次数都无法满足 REG 接入的需求,而配电网静止同步补偿器由于具有响应快、损耗小、可连续双向调节的特点而逐渐成为现阶段有源配电网调压的首选。文献[2]分析了异步风电场的临界切除时间和无功补偿设备容量之间的关系,基于风电场转矩特性和功率潮流,提出了适应于大容量异步风电场的 STATCOM 容量配置方法。文献[3]引入资金运营理论,提出了配电网抵御电压暂降所需 D-STATCOM 配置容量的计算模型。文献[4]提出了计及负荷特性的阻抗裕度指标,并在此基础上提出了动态无功补偿装置优化配置的新方法。文献[5-8]针对不同的应用场合提出了多种 D-STATCOM 控制方法。总体看来,目前的文献多数只关注 D-STATCOM 的功能和具体控制策略,而对于如何在满足调压需求的情况下尽量减少成本投资,进行合理容量配置鲜有提及。

本研究对可再生能源接入配电网的电压波动机理进行分析,通过灵敏度确定配电线路的特征参数,提出一种适应可再生能源发电接入配电网的 D-STATCOM 容量配置方法。该方法以抑制可再生能源发电造成的最大电压波动为目的,把线路特征参数对电压的灵敏度通过统一目标的多元线性回归拟合得到 D-STATCOM 的容量配置推荐公式。

1 D-STATCOM 容量配置思路

本研究采用的基于灵敏度分析和多元线性回归方法的 D-STATCOM 配置思路如图 1 所示。

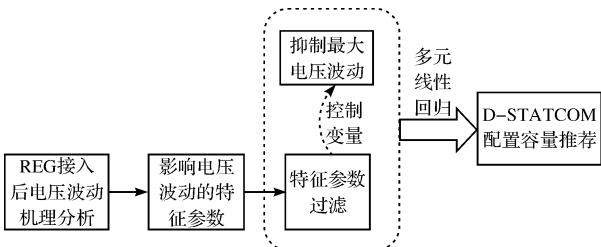


图 1 D-STATCOM 配置思路

具体表述为:首先,从规划角度出发,分析 REG 接

入配电网后对配电网电压的影响机理,确定造成电压波动的特征参数;再者,选择影响较大的特征参数作为边界条件,通过控制变量的形式,采用试探法和潮流计算得到在不同特征参数下抑制最大电压波动所需的 D-STATCOM 容量,进而分析各参数与 D-STATCOM 配置容量的灵敏度和相关性;最后,基于灵敏度分析,总结出在数据缺省情况下的 D-STATCOM 容量配置推荐范围,并通过多元线性回归方法求得 D-STATCOM 容量配置推荐公式。

2 REG 接入配电网的电压波动机理

单个 REG 接入的典型配网线路负荷分布如图 2 所示。

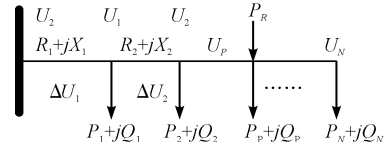


图 2 REG 接入的配电网线路示意图

N —用户数; U_0 —线路首端电压; $P_n + jQ_n$ ($n = 1, 2, \dots, N$)—第 n 个用户复功率; U_n ($n = 1, 2, \dots, N$)—线路上第 n 个用户电压; $R_n + jX_n$ — $n - 1$ 个用户和第 n 个用户之间线路阻抗。 P_R —REG 的输出功率。(REG 接入 p ($1 \leq p \leq N$) 用户,并网点称为 POC 点)

在 REG 接入之前,第 k 个用户的电压为:

$$\dot{U}_k = \dot{U}_0 - \sum_{m=1}^k \Delta \dot{U}_m - j \sum_{m=1}^k \delta \dot{U}_m \quad (1)$$

式中: U_0 —10 kV 变电站母线电压, ΔU_m —电压差的纵分量, δU_m —电压差的横分量。

由于在电压差计算中横分量一般较小,忽略电压差横分量的影响,则有:

$$\dot{U}_k = \dot{U}_0 - \sum_{m=1}^k \frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{\dot{U}_m} \quad (2)$$

而出于调度和运行方面的考虑,目前的接入配电网中的 REG 一般都按照单位功率因数出力,即只发有功不发无功,因此 REG 接入后的 POC 电压为:

$$\dot{U}'_p = \dot{U}_0 - \sum_{m=1}^p \frac{\sum_{n=m}^N (P_n - P_R) R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{\dot{U}'_m} \quad (3)$$

定义 REG 接入后 POC 点的节点电压与 REG 接入前该节点的电压之差为电压波动 $\Delta U'_p$,则:

$$\Delta \dot{U}'_p = \dot{U}'_p - \dot{U}_p \quad (4)$$

代入以上参数,则有:

$$\Delta \dot{U}'_p = \sum_{m=1}^P \begin{pmatrix} \frac{\sum_{n=m}^N P_n R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{\dot{U}_m} \\ \frac{(\sum_{n=m}^N P_n - P_R) R_m + \sum_{n=m}^N Q_n X_m}{\dot{U}'_m} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可知,REG 接入后影响 POC 节点电压的具体参数有:沿线负荷 $P_n + jQ_n$, REG 的出力 P_R , 线路的阻抗值 $R_n + jX_n$ 。而从规划的角度来看, $\Delta U'_p$ 的影响因素包括 REG 的配置容量、REG 的接入点位置、配变负载率、主干线长度和线路横截面积。

3 并网点与负荷分布对电压波动的影响

由上节可知,REG 接入配电网前后产生电压波动涉及的影响因素太多,如果要全面考虑各个参数条件来进行无功配置的话,不仅会增加配置规划的工作量和难度,也有可能因为运行状况多变、难以兼顾满足各种因素而得不到最终的规划配置方案。因此,本节先对 REG 并网点和负荷分布这两个因素对配电网电压波动的影响进行研究。馈线模型如图 3 所示。

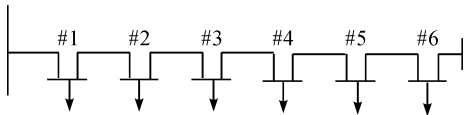


图 3 10 kV 馈线模型示意图

在该馈线模型中,6 个负荷节点的配变容量都为 1 000 kVA,平均负载率为 30%,主干线长度为 6 km。现本研究把一个容量为 3 MW 的 REG 分别在 #1、#2 到 #6 依次接入,在不同位置接入的馈线节点电压 U 分布如图 4 所示。

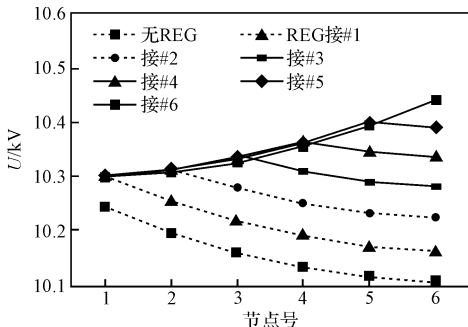


图 4 REG 在不同位置接入的节点电压分布图

由图 4 可见,在没有 REG 接入的时候,由于功率

单向流动,馈线的节点电压从变电站 10 kV 母线开始沿线降低,线路末端节点为电压最低点;当 REG 在 #1 接入的时候,全线的节点电压整体被抬高,但由于电压降的累积,末端节点仍然相对偏低;当 DG 在 #2 接入的时候,#1 的节点电压并无明显变化,而 #2 及之后的节点电压均有明显抬升,抬升幅度比 DG 在 #1 接入的时候更大,说明 REG 在 #2 接入给 POC 点可能带来的电压波动比在 #1 接入更大。同理,当 REG 在 #3、#4、#5 和 #6 接入的时候,其对馈线节点电压的支撑作用更明显,即 REG 的出力对 POC 点可能造成的电压波动幅度会更大。

因此,当 REG 在馈线末端的节点接入的时候对电压的抬升作用最明显,其对 POC 点可能造成的电压波动幅度最大,而在实际的电网运行中,分布式电源一般也分布在远离变电站而靠近负荷中心的线路中末端。从这个角度出发,在考虑动态无功配置抑制 REG 造成的电压波动时,可把 REG 造成 POC 点的电压波动都按照在线路末端接入的极端情况考虑。既可以精简所需数据和步骤,减轻规划配置的计算和工作量,也可以更好地满足系统运行的安全性和稳定性,为系统的无功电压控制预留足够的裕度。

接下来考察在负荷平均分布和负荷随机分布下 REG 接入对电压造成的波动,负荷平均分布是指各个负荷点的负载水平都为 30%,负荷随机分布是指各个负荷点的负载水平不同但平均负载率同为 30%。现把一个容量为 3 MW 的 REG 在 #6 接入,接入前后馈线的节点电压 U 分布趋势如图 5 所示。

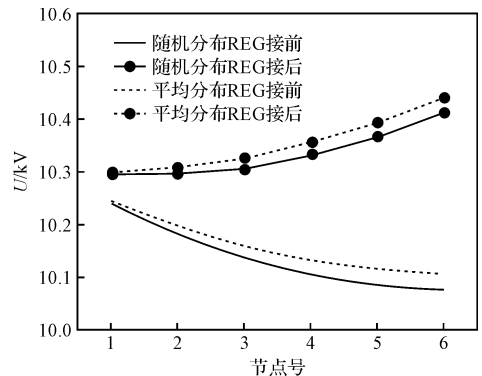


图 5 两种负荷分布 REG 接入前后的节点电压分布图

由图 5 可以看出,在 REG 接入前的两种负荷分布下,节点电压都是沿线降低;而在 REG 接入后两种负荷分布下节点电压都是沿线升高。尽管在 REG 接入前后负荷随机分布和负荷平均分布的节点电压绝对数值都有不小的偏差,但从抑制 REG 接入后对并网点造成的电压波动角度,由图 5 可看出,在负荷随机分布下

REG 接入前后造成的电压波动偏差值基本上等于负荷平均分布下的电压波动偏差值,因此可采用负荷平均分布的方式计算得到的无功配置需求来代替实际中负荷随机分布的无功配置需求。

4 适应 REG 接入的 D-STATCOM 配置计算

通过上节可知负载率、负荷分布方式对 REG 接入造成的电压波动影响甚微,因此在进行 D-STATCOM 配置时可将其作为一个无关变量考虑,主要考虑 REG 接入容量、线路长度和横截面积 3 个参数。

4.1 D-STATCOM 对线路参数的灵敏度分析

本研究设定线路的主干线路横截面积为 185 mm^2 ,线路配变的平均负载率为 30%,负荷功率因数为 0.9,并在线路末端节点接入容量为 3 MW 的 REG。以控制变量法的形式,将线路的主干长度从 4 km 逐步增加到 14 km,考察 REG 接入前、后并网点电压波动变化,并通过试探法和潮流计算得到在不同主干长度下抑制电压波动所需的 D-STATCOM 容量,具体结果如表 1 所示。

表 1 不同主干长度的电压波动及 D-STATCOM 容量需求

主干长度/ km	接入前 电压/kV	接入后 电压/kV	电压波动/ kV	DSTATCOM 需求/kvar
4	10.209	10.400	0.191	1 280
6	10.163	10.443	0.280	1 240
8	10.116	10.482	0.366	1 210
10	10.069	10.518	0.449	1 170
12	10.022	10.550	0.528	1 135
14	9.974 0	10.578	0.604	1 100

由表 1 可知,在保持其他参数一致条件下,随着线路主干长度的逐渐增长,REG 接入对并网点造成的电压波动幅度逐渐增加,但相对应的需要抑制这个电压波动所需要的 D-STATCOM 容量却逐步减少。原因在于,随着线路长度增加,接在线路末端的 REG 出力会引起更大的电压波动,但同理接在并网点处的 D-STATCOM 产生的电压降落也随着线路长度增加而累积增加,由于配电线路中电抗值比电阻值大,即电压对无功的灵敏度更高,因此随着线路长度增加,对应需要抑制电压波动所需要的 D-STATCOM 容量会减少。

根据表 1 中的数据作出散点图如图 6 所示。

对散点数据采用一次函数拟合,得到两者的函数关系为:

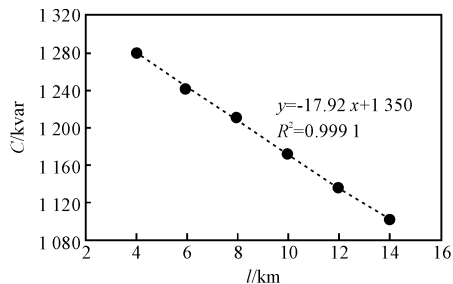


图 6 不同主干长度的 D-STATCOM 容量需求图

l —横坐标,配电线路的主干长度; C —纵坐标,抑制电压波动的 D-STATCOM 的容量需求。

$$y = -17.929x + 1350.5 \quad (6)$$

式中: y —抑制电压波动的 D-STATCOM 的容量需求; x —配电线路的主干长度; R —拟合程度指标, $R^2 = 0.9991$ 。

由此可见该拟合函数与实际数据吻合度较高,能较好地反映实际数据的趋势走向。

同理,本研究采用控制变量法和试探法得到 D-STATCOM 容量需求对其他线路参数的灵敏度和拟合函数,如表 2 所示。

表 2 各影响因素对 D-STATCOM 容量需求的拟合结果

主干横截 面积	影响因素	灵敏度分析拟合结果
185 mm ²	负载率	$y = 1.0071x + 1210.3, R^2 = 0.989$
	主干长度	$y = -17.929x + 1350.5, R^2 = 0.999$
	REG 容量	$y = 342.36x + 173.29, R^2 = 0.995$
240 mm ²	负载率	$y = 0.8643x + 944.86, R^2 = 0.992$
	主干长度	$y = -15.271x + 1061.6, R^2 = 0.998$
	REG 容量	$y = 259.68x + 154.29, R^2 = 0.992$
300 mm ²	负载率	$y = 0.95x + 753.71, R^2 = 0.998$
	主干长度	$y = -13.457x + 859.78, R^2 = 0.997$
	REG 容量	$y = 201.14x + 142.71, R^2 = 0.989$

由表 2 可知,各个影响因素的函数拟合效果都比较好,拟合程度指标基本都趋近于 1,说明拟合的函数式能较好地反映数据的趋势走向。同时,从灵敏度系数来看,负载率的灵敏度很小,只有个位数级别,可见负载率对 D-STATCOM 容量需求的影响并不大;而主干长度的灵敏度达到两位数,对 D-STATCOM 容量需求有一定影响;REG 容量的灵敏度最大,说明其对 D-STATCOM 的容量需求起主要影响作用。

4.2 适应 REG 的配电网 D-STATCOM 配置方法

综合本研究前面的理论推导和仿真分析,对含 DG 的配电网动态无功配置结论与建议如下:

(1) 考虑到目前 REG 大多数是以中低压的方式在配电线路中末端接入,为减少 D-STATCOM 配置规

划的数据量和计算复杂程度,同时也为系统运行预留一定的规划配置裕度,可以考虑统一把 REG 按照在线路末端接入来配置。

(2)REG 接入容量是影响配电线路节点电压波动的最重要因素,在数据缺省、计算不便的条件下,可按照单个 REG 容量估算进行 D-STATCOM 配置。

容量配置推荐表如表 3 所示。

表 3 单台 REG 所需 D-STATCOM 容量配置推荐表

REG 容量/MW	D-STATCOM 配置/kvar
1	300 ~ 500
2	500 ~ 800
3	800 ~ 1 200
4	1 000 ~ 1 600
5	1 200 ~ 2 000
6	1 400 ~ 2 200
7	1 500 ~ 2 500

(3)本研究主要考虑 REG 的配置容量、配变负载率、线路主干长度和横截面积四个因素对配电网动态无功配置的灵敏度和需求影响,并汇总得到适应 REG 接入的配电网 D-STATCOM 配置方法。

在数据允许、可以精确计算进行规划的前提下,可以综合考虑 REG 接入容量、线路长度和横截面积 3 个主要影响因素进行配置容量计算。由于线路的横截面积可量化考虑以线路的阻抗比来代替,本节综合各影响因素的仿真及 D-STATCOM 容量需求对各主要参数的灵敏度分析,通过 MATLAB 软件的多元线性回归拟合得到含 REG 的配电网 D-STATCOM 容量配置推荐公式如下所示:

$$Y = 262X_c - 14.3X_l + 3090.5X_r - 837.7 \quad (7)$$

式中: X_c —REG 接入容量, MW; X_l —主干线长度, km; X_r —主干线的阻抗比。

本研究根据该推荐公式在进行含 REG 的配电网 D-STATCOM 配置时,根据配置线路的主干线长度和阻抗比,以单个确定容量的 REG 并网点为对象,计算抑制该 REG 可造成的最大电压波动所需要配置的 D-STATCOM 容量。若线路中有多个 REG 接入,则分别应用推荐公式进行计算配置。

5 算例仿真

为检验本研究所得的 D-STATCOM 容量配置方法的计算结果对 REG 接入造成的电压波动的抑制效果,现在本研究以南方地区某几条实际线路为例进行算例仿真。两条城镇线路的特征参数如表 4 所示,对这两条城镇线路的仿真结果如表 5 所示。

表 4 城镇线路的特征参数

线路名称	REG 容量/MW	主干长度/km	线路阻抗比
线路 A	4	5.6	0.583
线路 B	6	3	0.615

表 5 城镇线路的仿真效果对比

线路名称	计入前电压/kV	接入后电压/kV	推荐配置 D-STATCOM 容量/kvar	调节后节点电压/kV
线路 A	10.28	10.405	1932	10.28
线路 B	10.02	10.196	2592	10.03

由表 4、表 5 可知,根据本研究的 D-STATCOM 容量配置方法,只需要获取线路的 REG 接入容量、主干长度和线路阻抗比,即可根据配置公式计算得到抑制该 REG 造成的最大电压波动所需的 D-STATCOM 容量。REG 接入后显著提高了 POC 的节点电压,而根据本研究方法得到的推荐容量进行配置后,D-STATCOM 的快速响应调节可以刚好完全抑制 REG 造成的骤然电压波动,使得 POC 的节点电压回到 REG 接入前的水平。

为更好地验证本研究配置方法的效果和适用性,笔者再次选取了两条实际的农村线路进行仿真验证,线路特征参数如表 6 所示,仿真结果如表 7 所示。

表 6 农村线路的特征参数

线路名称	REG 容量/MW	主干长度/km	线路阻抗比
线路 A	3	9.1	0.447
线路 B	5	9.27	0.425

表 7 农村线路的特征参数

线路名称	计入前电压/kV	接入后电压/kV	推荐配置 D-STATCOM 容量/kvar	调节后节点电压/kV
线路 C	9.85	10.337	1200	9.88
线路 D	10.47	11.25	1962	10.51

由表 6、表 7 可知,本研究的 D-STATCOM 配置方法同样可以适用于农村线路,推荐配置的 D-STATCOM 容量可以很好地完成电压调节。以上仿真都是按照 REG 的最大出力进行,而在实际运行和规划中,考虑到安全裕度和容量取整配置,也可在计算得到推荐容量后适当调整增加,以保证系统安全运行。

6 结束语

本研究分析了可再生能源发电接入配电网后的电压波动机理,通过理论推导得出与之相关的影响因素,并通过灵敏度分析得到主要的线路特征参数,通过统一目标的多元线性回归拟合给出适应可再生能源发电接入配电网的 D-STATCOM 容量配置方法。仿真结果表明,该方法需要的计算参数较少,操作简

单,可以抑制可再生能源发电造成的最大电压波动,与实际线路的潮流仿真结果对比,计算所得的推荐配置容量刚好是可以满足调压需求的最小投资配置容量值。

本研究所提的 D-STATCOM 容量配置方法不需要收集过多的计算参数,不依赖复杂的优化计算,适用于目前我国开环运行的辐射型配电线路,可用于指导可再生能源发电接入较多引发电压问题的配电区域。下一阶段可进一步考虑可再生能源发电的概率和出力特性,研究与该容量配置方法对应的 D-STATCOM 协调控制方法。

参考文献(References):

- [1] LUO An, XU Qianming, MA Fujun, et al. Overview of power quality analysis and control technology for the smart grid[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2016, 4(1): 1-9.
- [2] 姚俊,周特,陈知前. 电网对称故障下定速异步风电

场 STATCO 容量配置研究[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(1): 45-54.

- [3] 曹华珍,莫一夫,林小朗,等. 基于资金运营理论的配电网 D-STATCOM 优化配置[J]. *电气应用*, 2015, 34(7): 34-38.
- [4] 李帅虎,曹一家,刘光晔. 基于阻抗模裕度指标的动态无功补偿装置优化配置方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3791-3798.
- [5] 张春朋,洪潮,史丹. 基于 PWM 实时分配的链式 STATCOM 均压控制方法[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2015, 36(4): 1-5.
- [6] 张立娜,刘青. 基于 Hamilton 理论抑制区域间低频振荡的 STATCOM 控制策略研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(4): 19-23.
- [7] 魏承志,苏杰和,文安,等. 含 DSTATCOM 和分布式电源配电网的无功电压协调控制[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 132-137, 163.
- [8] 杨昆,陈国柱. 基于重复控制的 DSTATCOM 补偿电流控制[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(10): 80-85.

[编辑:周昱晨]

(上接第 281 页)

6 结束语

本研究提出了 Matlab 与 LabVIEW 混合仿真的新方法,解决了传统永磁同步电机的控制设计仿真时,单独使用 Matlab 时多参数整定复杂繁琐的问题。在理论分析数学模型的基础上,分别建立了传统 Matlab 仿真模型与混合仿真模型对电机进行仿真实验。结果表明,该混合仿真模型与 Matlab 单独仿真模型的结果具有较高的吻合性,并符合理论计算结果,验证了该混合仿真方法的可靠性。该混合仿真方法的应用既简化了永磁同步电机控制系统的参数整定,又能从 LabVIEW 界面上直接查看仿真波形,进一步缩短了调试时间,大大提高了系统仿真效率。

参考文献(References):

- [1] 王宏,于泳,徐殿国. 永磁同步电动机位置伺服系统[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(7): 151-155.
- [2] 王恩德,黄声华. 表贴式永磁同步电机伺服系统电流环设

计[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(33): 82-88.

- [3] GAO Bao-dong, WANG Jian-ping, CHENG Fan, et al. The simulation of direct torque control fuzzy control system based on Labview and Matlab [C]// *Proceeding of the 2014 2nd International Conference, The Netherlands: Systems and Informatics (ICSAI)*, 2014.
- [4] 王军. 永磁同步电机智能控制技术[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2015.
- [5] 王平羽. 基于滑模观测器的永磁同步电机矢量控制研究[D]. 辽宁:大连理工大学电气工程学院, 2015.
- [6] 李雪恺,陈勇,张鑫彬,等. 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(9): 73-77.
- [7] 李宏,张勇,王晓娟,等. 永磁同步电机 SVPWM 控制策略仿真研究[J]. *微电机*, 2009, 42(1): 86-88, 97.
- [8] 袁登科,陶生桂. 交流永磁电机变频调速系统[M]. 1 版. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [9] 刘力卿. 基于 Matlab&LabVIEW 的双馈型风电机组仿真系统设计[D]. 河北:华北电力大学电气与电子工程学院, 2012.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

杨雨瑶,张勇军,黄向敏. 适应可再生能源分布式发电的 D-STATCOM 容量配置研究[J]. *机电工程*, 2017, 34(3): 298-303.

YANG Yu-yao, ZHANG Yong-jun, HUANG Xiang-min. Capacity allocation of D-STATCOM adapting to renewable energy generation in distribution networks [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(3): 298-303.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>