

分段式笼型转子无刷双馈电机的设计与分析^{*}

杜 恽, 熊婷婷, 仲 叙, 卢 伟

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘 要: 无刷双馈电机(BDFM)在风力发电系统中具有广阔的应用前景。其转子的磁场调制能力优劣直接影响着该类电机的功率密度和效率。基于笼型转子结构提出一种分段式笼型转子结构。介绍了 BDFM 的拓扑结构和变速恒频发电的基本原理, 将几种笼型转子结构的 BDFM 进行有限元对比分析, 深入研究转子导条间隔角度和导条层数对新型转子耦合能力的影响, 确定了使得分段式笼型转子具有较强磁场调制能力的结构参数。结果表明: 该新型转子结构在保证一定耦合能力的情况下, 端部空间利用率更高, 电机功率密度更大, 且转子结构简单可靠、易于制造。

关键词: 无刷双馈电机; 分段式笼型转子; 转子导条间隔角度; 转子导条层数; 有限元分析

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)11-0045-05

Design and Analysis of Brushless Doubly-Fed Motor with Segmented Squirrel-Cage Rotor^{*}

DU Yi, XIONG Tingting, ZHONG Xu, LU Wei

(College of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Brushless doubly-fed motor (BDFM) had promising application prospect in wind power generation. Coupling capability of rotor was an important factor affecting the power density and efficiency of the motor. Based on the analysis of structures of cage rotor, a segmented squirrel-cage rotor was presented. At first, the topology of the BDFM and the principle of variable-speed constant-frequency (VSCF) generation were introduced. Secondly, analysis of BDFM with the above rotor structures was carried out using finite element software. Finally, the key parameters affecting the coupling capability were analyzed, such as spacing angle of rotor bars and layer number of rotor bars. The results showed that the new rotor structure held higher end space utilization ratio, higher motor power density and simple and reliable rotor structure under certain coupling capability.

Key words: brushless doubly-fed motor (BDFM); segmented squirrel-cage rotor; spacing angle of rotor bars; layer number of rotor bars; finite element analysis

0 引 言

全球经济的飞速发展带来了能源短缺和环境污染等问题, 而大力开发新能源不仅能补充常规能源而且利于减少环境污染, 真正意义上实现可持续发展。在全球范围内, 风能是仅次于光能的可再生能源, 预计至 2035 年, 风力发电总量将达

到新能源发电总量的 1/4。当前主流的风力发电机为以下 3 种: 永磁同步发电机、电励磁同步发电机以及双馈感应发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG)^[1-7]。其中, DFIG 凭借其高转矩密度、小容量的系统功率变换器以及无功、有功功率解耦控制等优点, 是陆上风力发电的主流机型。但是 DFIG 中存在的电刷和集电环, 既增加日常

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51307072)

作者简介: 杜 恽(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为永磁电机设计与控制。

熊婷婷(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为无刷双馈电机设计与控制。

仲 叙(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机设计与控制。

维护成本又降低系统可靠性。近年来永磁直驱式的风力发电机受到更广泛的关注,然而其受到永磁体价格波动的影响,研究少用或者不用稀土永磁材料的风力发电机成为发展趋势。

无刷双馈电机 (Brushless Doubly-Fed Motor, BDFM) 应用在风力发电系统,解决了上述问题。BDFM 的定子上安装极对数不同的 2 套绕组,通过特殊转子的磁场调制作用进行间接耦合,功能与“极数转换器”一致,转子调制性能优劣影响着 BDFM 的功率密度^[8-12]。BDFM 的转子类型主要包括:磁阻转子、绕线转子、笼型转子等。其中,磁阻转子是利用气隙磁导不同来进行磁场调制,磁阻转子主要分为普通凸极转子、径向叠片磁阻转子和轴向叠片磁阻转子,前者调制效果差,后两种转子加工工艺复杂。华中科技大学提出的新型绕线转子具有空载电流小、效率高等优点,因其特殊的结构使得设计灵活性受限,不适用于多极数转子的情况。笼型转子与传统感应电机转子的加工工艺相似,可靠性高,但调制效果欠佳^[13-14]。

本文提出一种分段式笼型转子结构,并详细介绍分段式笼型转子无刷双馈电机 (Brushless Doubly-Fed Motor with Segmented Squirrel-Cage Rotor, SSC-BDFM) 的电机拓扑结构以及风电系统变速恒频发电的基本原理^[15-16]。利用有限元软件对几种笼型转子的 BDFM 进行对比分析,并调整转子结构参数得到具有较强耦合能力的分段式笼型转子结构的 BDFM。

1 BDFM 的基本结构及工作原理

BDFM 的系统结构图如图 1 所示。

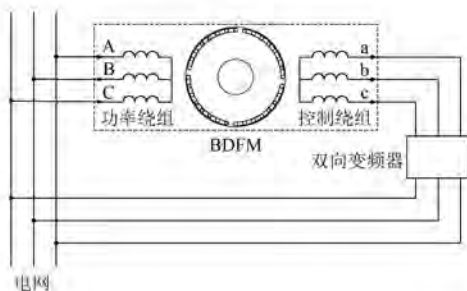


图 1 BDFM 的系统结构图

BDFM 定子铁心上安装两套相互独立的绕组:功率绕组和控制绕组。两套绕组极对数分别为 p 、 q 。一般情况下选用极对数多的作为功率绕组直接

与电网相连,以承担电机绝大部分功率,选用极对数少的作为控制绕组以承担励磁功率,即 $p > q$ 。

BDFM 稳定运行时,转子转速为

$$n_r = \frac{60(f_p \pm f_q)}{(p + q)} \quad (1)$$

式中: f_p ——功率绕组电流频率;

f_q ——控制绕组电流频率。

若两套绕组同相序连接,式(1)中取“+”号,此时电机运行在超同步状态;如果功率、控制绕组反序相连,取“-”号,电机处在亚同步运行状态。

在式(1)中,电机转子转速 n_r 随风速变化而变化,变频器需要根据风速变化而相应调整向控制绕组端提供励磁电流的频率和大小,使得功率绕组端输出恒定频率的电供给电网,从而实现变速恒频发电。在 BDFM 风力发电系统中,按照控制绕组所承担的励磁功率大小选取相应容量的变频器,故系统所需变频器容量远小于无刷双馈发电机总容量,因而较其他电机风力发电系统而言,配套小容量的变频器,使得整体系统成本降低。

BDFM 定子上两套绕组的极对数不同,故在气隙中形成不同极对数的旋转磁场。由于两种旋转磁场的极对数不同,须借助具有特殊结构的转子进行间接耦合,因此 BDFM 中转子具备“极数转换器”的功能,转子、功率绕组和控制绕组三者极对数关系应满足:

$$N = p \pm q \quad (2)$$

式中: N ——转子极对数。

式(2)中“ $\pm$ ”对应两种调制方式:“和调制”与“差调制”,其中,“和调制”时的转子等效极对数多,适用于风力发电机转子转速较低的情况,故本文选用“和调制”。

为了有效减小不对称磁拉力和电磁噪声,定子上两套绕组的极对数应满足:

$$p - q \geq 2 \quad (3)$$

为了实现定子两套绕组的良好耦合,尽量选用近极对数配比,故选择极对数 $p = 3$ 的功率绕组,极对数 $q = 1$ 的控制绕组,即转子极对数 $N = 4$ 。

2 SSC-BDFM 转子设计

转子磁场调制效果的优劣直接影响着 BDFM 的运行性能,所以设计合适的转子结构是提高 BDFM 性能的有效手段之一。目前,主要的笼型

转子结构有:同心式笼型转子、具有公共端环的同心式笼型转子和等距笼型转子,分别如图 2(a)~图 2(c)所示,转子环路组数是 4,每组导条层数是 n 。上述几种特殊的笼型转子结构中,转子感应电流成 4 组环流分布,该感应电流在转子中产生的空间磁动势含有 p 次、 q 次谐波,因此可以实现转子磁场极对数的自动转换。图 2(a)、图 2(b)中两种同心式转子回路的节距不等,其中,外层导条的节距接近极距,故外层导条感应电势大;内层导条的节距小而感应电势小。转子电流绝大部分流经外层导条,等同于转子导条的等效面积变小,故而转子的等效电阻变大,BDFM 损耗增加,降低了稳定性。图 2(c)中的等距转子结构,与上述两种笼型转子结构相比,转子回路中感应电流比较均匀,转子电流流经所有导条,较前两者转子导条的等效面积为大,故而转子的等效电阻相应变小,电机损耗变小,电机性能得到提高。

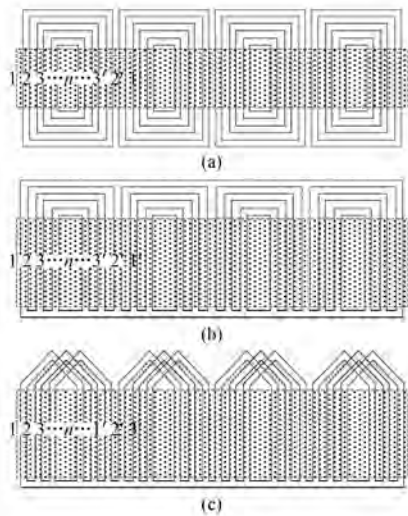


图 2 不同连接方式的笼型转子结构

图 2(a)~图 2(c)虚线框表示的是电机转子实际参与磁场调制的部分,可以看出上述转子结构虽一定程度上改善了 BDFM 的性能,但是复杂的端部设计使得制造样机时造成严重的端部空间浪费。针对上述问题,提出一种分段式笼型转子的新结构,如图 3 所示。该转子回路中除最外层的 1、1' 导条感应电流略大,其余导条感应电流分布均匀,因而分段式笼型转子的等效电阻小于图 2(a)、图 2(b)的等效电阻,且略大于图 2(c)的等效电阻。虽然分段式笼型转子等效电阻值不是最

佳,但如图 3 中虚线框所示,采用新结构转子的 BDFM 的端部空间利用率大大提高,电机功率密度提高。

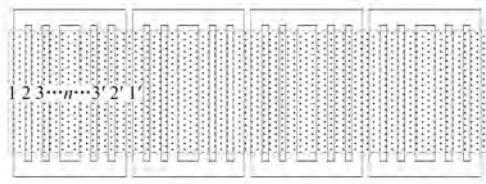


图 3 分段式笼型转子结构

3 有限元仿真分析

3.1 BDFM 几种笼型转子耦合能力对比

为了定量地比较上述几种转子结构的耦合能力,分别建立模型进行有限元分析。在保证定子结构尺寸、定子绕组结构参数、电机运行条件和转子铁心等不变的情况下,对比分析不同导条连接方式下的转子结构的耦合能力。BDFM 的主要参数如表 1 所示。

表 1 BDFM 的主要参数

参数名称	参数值
定子槽数	36
功率绕组极数	6
控制绕组极数	2
定子外径/mm	260
定子内径/mm	170
气隙长度/mm	0.5
铁心长度/mm	195
额定转速/(r·min ⁻¹)	750

BDFM 通过电机气隙磁场的有效谐波实现机械能到电能的转换。通过对上述几种不同导条连接方式的转子结构的 BDFM 气隙磁场中的有用谐波含量分析,即可比较出几种转子的磁场调制能力。本文定子上两套绕组的极数分别为 6 和 2,所以气隙磁场内有有用谐波的次数分别为 3 和 1,其他次数的谐波因为不参与机电能量转换,视为无效谐波。先对上述几种转子结构的 BDFM 极对数 $p=3$ 的功率绕组单独励磁,分析通过转子气隙磁场耦合作用,产生 3 次谐波含量和 1 次谐波含量(对应控制绕组极对数 $q=1$);再对上述 BDFM 控制绕组单独励磁,分析通过转子气隙磁场调制

气隙中 1 次谐波含量和 3 次谐波含量(对应功率绕组极对数 $p=3$)。

按上述方法对同心式笼型转子、具有公共端环的同心式笼型转子、分段式笼型转子和等距笼型转子分别进行单边励磁(4 种类型不同连接方式的笼型转子代号依次为 1、2、3、4), 所得到的磁密谐波含量如图 4(a)、图 4(b) 所示。从左至右, 可以看到转子气隙磁场中有效谐波含量按序增大, 所提出的 3 号分段式鼠笼转子的磁场耦合能力优于 1、2 号转子, 但略低于 4 号转子; 3 号转子结构的端部空间利用率高, 且较其他转子结构制造工艺简单, 可靠性更高。

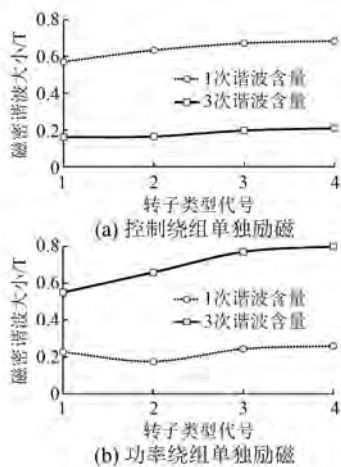


图 4 4 类不同连接方式的笼型转子耦合能力

3.2 转子导条间隔角度对 BDFM 转子磁场调制能力的影响

图 5 为笼型转子的转子导条间隔角度示意图。凸极转子极弧系数定义: 凸极导磁层和每对极沿转子表面的长度或角度的比值。极弧系数可以表示为

$$\lambda = \frac{\beta_1}{\beta_2} \quad (4)$$

类似于极弧系数影响凸极转子的磁场调制能力, 笼型转子的极弧系数也与电机饱和程度和气隙磁密的谐波含量相关。图 5 中, 虚线表示分段式笼型转子导条的连接方式。为了更简洁地表示笼型转子的极弧系数对转子磁场调制能力的影响, 选用转子导条间隔角度 α 作为变量, 建立 α 为 $4^\circ \sim 9^\circ$ 等角度的 BDFM 仿真模型, 分别进行有限元分析。3 对极的功率绕组和 1 对极的控制绕

组各自单独励磁, 分别对其气隙磁通密度进行频谱分析, 分析各自产生的 1 次谐波和 3 次谐波的大小, 以得到合适的笼型转子导条间隔角度 α 取值范围。

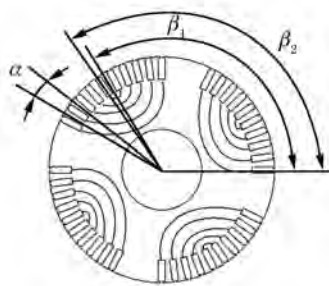


图 5 笼型转子的转子导条间隔角度

图 6 所示为笼型转子导条不同间隔角度下, 电机气隙磁通密度有效谐波分量。

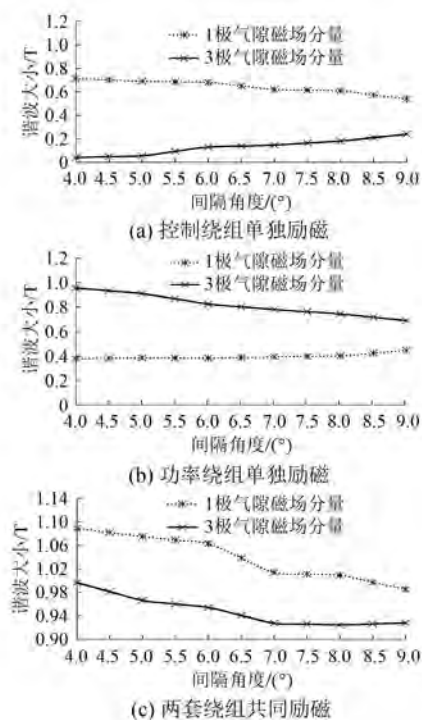


图 6 分段式笼型转子导条的间隔角度对气隙磁通密度有用谐波的影响

图 6(a) 中, 控制绕组单独励磁时, 伴随 α 变小, 气隙中与控制绕组极对数相同的 1 次谐波逐渐增大, 3 次谐波含量减小; 图 6(b) 中, 当功率绕组单独励磁时, 随着转子导条间隔角度 α 逐渐变小, 3 次谐波分量逐步变大, 而 1 次谐波分量逐步变小; 如图 6(c) 所示, 当两套绕组共同励磁时, 1、

3次谐波分量与转子导条间隔角度成负相关增长,且在转子间隔角度 $\alpha < 5.5^\circ$ 时,上述两次谐波分量增长渐缓。故仅从有效谐波角度考虑,笼型转子的导条间隔角度取值范围 α 为: $4.0^\circ \sim 5.5^\circ$ 。但是考虑到转子间隔角度过低会引起BDFM转子的局部饱和现象,合理的笼型转子导条间隔角度 α 取值范围为: $4.5^\circ \sim 5.5^\circ$ 。

3.3 转子导条层数对BDFM转子磁场调制能力的影响

转子磁场调制能力与转子导条层数有关,合理选择转子导条层数对于提高转子耦合能力至关重要。依次建立转子导条层数为2~7层的BDFM仿真模型,分别进行单边励磁,通过磁场分析来计算气隙磁场有效谐波分量,结果如表2所示。可以看到,随着转子导条层数增加,两套绕组各自单独励磁时,产生的有效谐波(1次和3次)含量都相应增加,转子的磁场调制效果跟转子导条的层数成正相关。当转子导条层数超过6层时,有效谐波含量的增长速度减缓。综合考虑电机的成本、制造工艺和运行可靠性,转子导条层数选定为5~6层。

表2 不同转子导条层数的谐波含量

转子导条层数		2	3	4	5	6	7
控制绕组励磁	1次谐波/T	0.778	0.784	0.784	0.788	0.793	0.797
	3次谐波/T	0.220	0.225	0.226	0.233	0.245	0.246
	3次与1次谐波比值/%	28.2	28.7	28.8	29.5	30.8	30.8
功率绕组励磁	1次谐波/T	0.413	0.425	0.437	0.448	0.450	0.453
	3次谐波/T	0.931	0.951	0.966	0.972	0.978	0.981
	1次与3次谐波比值/%	44.3	44.7	45.2	46.0	46.1	46.1

4 结 语

基于风力发电的工业背景,本文提出一种SSC-BDFM。在保证BDFM转子磁场调制能力的前提下,本文所提出的新结构的转子较好地解决了现有的几种笼型转子端部空间利用率低的问题,提高了电机功率密度。为了获得磁场耦合能力最佳的转子结构,同时兼顾转子局部饱和问题,合理的笼型转子导条间隔角度 α 的取值范围是: $4.5^\circ \sim 5.5^\circ$;转子磁场耦合能力与转子导条层数成

正相关,当转子导条层数大于6层时,有效谐波含量的增长速度减缓,考虑到转子导条层数过多会导致电机制造工艺复杂以及成本增加,因此转子导条层数选为5~6层。

【参考文献】

- [1] RUVIARO M, RUNCOS F, SADOWSKI N, et al. Analysis and tests results of a brushless doubly-fed induction machine with rotary transformer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2670-2677.
- [2] CHENG M, LUO R S, WIE X C. Design and analysis of current control methods for brushless doubly-fed induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 717-727. doi:10.1109/tie.2018.2829688.
- [3] 程明,韩鹏,魏新迟.无刷双馈风力发电机的设计、分析与控制[J].电工技术学报,2016,31(19): 37-53.
- [4] ESCH J. High-power wind energy conversion systems state-of-the-art and emerging technologies [J]. Proceedings fo the IEEE, 2015, 103(5): 736-739.
- [5] 林显军,程小华.开关磁阻风力发电技术[J].电机与控制应用,2011,38(9): 46-50.
- [6] STROUS T D, WANG X, POLINER H, et al. Brushless doubly fed induction machines: magnetic field analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(11): 8108310.
- [7] ROBERTS P C, MCMAHON R A, TAVNER P J, et al. Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2005, 152(4): 933-942.
- [8] ORAEE A, ABDI E, ABDI S, et al. Effect of rotor winding structure on the BDFM equivalent circuit parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2015, 30(4): 1660-1669.
- [9] XIONG F, WANG X F. Design of alow-harmonic-content wound rotor for the brushless doubly fed generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(1): 158-168.
- [10] KNIGHT A M, BETZ R E, DORRELL D G. Design and analysis of brushless doubly fed reluctance machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(1): 50-58.

(下转第125页)

分析。首先阐述绕组过热故障的产生原因并分别从电机热性能和参数辨识两方面进行故障检测。基于热性能原理建立电机热模型的方法较为复杂且准确性较差;基于参数在线辨识的方法先是通过DFIG在 d,q 坐标系下的电磁数学模型辨识定转子绕组电阻,再根据电阻与温度之间的函数关系计算出绕组温度,从而判断绕组是否过热。最后基于MATLAB软件仿真,不仅验证了定转子绕组参数辨识法正确可行,还为实际工程中设置电机定转子绕组温度的安全阈值提供了理论参考,便于绕组在发生过热故障初期的监测预警和后期的故障类别判定。

【参考文献】

- [1] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 沈标正.电机故障诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [3] 邓小凌,冯志文.我国风力发电产业发展的现状、问题与对策[J].电力环境保护,2001,17(3): 48-50.
- [4] 陈长征,梁树民.兆瓦级风力发电机故障诊断[J].沈阳工业大学学报,2009,31(3): 277-280.
- [5] 张国新.风力发电并网技术及电能质量控制策略[J].电力自动化设备,2009,29(6): 130-132.
- [6] 达夫勒 P J,彭曼 J.电机的状态监测[M].姜建国,史家燕,译.北京:水利电力出版社,1992.
- [7] 艾德胜. MPR-1 型综合式电动机保护装置的研制[J].电力自动化设备,1993,13(4): 42-50.
- [8] HURST K D, HABETLER T G. A thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines [C] // Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1997: 136-142.
- [9] 杜斌.基于参数在线辨识技术的交流异步电动机热保护系统[J].中国电机工程学报,1996,16(5): 328-331.
- [10] 金宇清,赵泽,鞠平,等.双馈感应风力发电机的参数辨识分析[J].高电压技术,2011,37(7): 1700-1705.
- [11] 鞠平.电力系统建模理论与方法[M].北京:科学技术出版社,2010.
- [12] 吴思诚,虞宝珠.热敏电阻温度补偿回路计算方法及其在电导仪中的应用[J].仪器仪表学报,1980(3): 40-45.
- [13] ALBIZU I, ZAMORA I, MAZON A J. Techniques for online diagnosis of stator shorted turns in induction motors[J]. Electric Power Components and Systems, 2006,31(1): 97-114.
- [14] 王兴武,张照彦,武勇利.变速恒频双馈异步风力发电机建模与仿真分析[J].计算机仿真,2009,26(10): 294-298.

收稿日期: 2018-05-31

(上接第 49 页)

- [11] 邓先明,姜建国.无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J].中国电机工程学报,2003,23(11): 126-133.
- [12] GORGINPOUR H, ORAEE H, MCMAHON R A. A novel modeling approach for design studies of brushless doubly fed induction generator based on magnetic equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013,28(4): 902-912.
- [13] 张凤阁,贾广隆,郑阳,等.无刷电励磁同步电机不同转子的对比分析[J].电工技术学报,2016,31(7): 41-49.
- [14] JIA L. Equivalent circuit parameters calculation of a wound rotor brushless doubly-fed machine based on finite element analysis [C] // IEEE International Magnetism Conference, 2015.
- [15] WILLIAMSON S, BOGER M S. Impact of inter-bar currents on the performance of the brushless doubly-fed motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999,35(2): 453-460.
- [16] 王秀平,张凤阁.新型转子无刷双馈电机电磁设计[J].电机与控制应用,2012,39(7): 12-15.

收稿日期: 2018-07-21