

开关磁阻电机振动转矩检测与分析^{*}

丁立军¹, 冯浩², 赵浩¹, 王宁黎²

(1. 嘉兴学院 机电工程学院, 浙江 嘉兴 314001;

2. 杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 开关磁阻电机(SRM)核心问题是振动转矩的检测与抑制, 众多研究已表明 SRM 的转矩变化与其相绕组电流紧密相关。为了观测 SRM 工作时的电流变化和振动转矩情况, 构建了磁阻电机的仿真系统, 对电机在角度位置控制(APC)、电流斩波控制(CCC)和电压斩波控制(CVC)3种模式下的振动转矩和电流情况进行了仿真, 结果表明以换相频率为主频的振动转矩非常明显。此外, 搭建了 SRM 振动转矩检测试验平台, 采用角加速度传感器检测了电机的实际振动转矩情况, 并对试验结果进行了分析讨论。

关键词: 开关磁阻电机; 振动转矩; 角加速度; 电流换相

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)03-0057-06

doi: 10.12177/emca.2019.175

Vibration Torque Detection and Experimental Analysis of Switched Reluctance Motor^{*}

DING Lijun¹, FENG Hao², ZHAO Hao¹, WANG Ningli²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China;

2. School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The core problem of switched reluctance motor (SRM) is the detection and suppression of vibration torque. The linear mathematical model of SRM is established, and the torque change of SRM is closely related to the phase winding current. In order to observe the current change and vibration torque of SRM, a simulation system of SRM is built and the vibration torque and current of SRM in three modes of angular position control (APC), current chopping control (CCC) and chopping voltage control (CVC) are simulated. The results show that the vibration torque with commutation frequency as the main frequency is very obvious. Meanwhile, an experimental platform for testing the vibration torque of SRM is set up, and the actual vibration torque of the motor is detected by angular acceleration sensor. The experimental results are analyzed and discussed.

Key words: switched reluctance motor (SRM); vibration torque; angular acceleration; current commutation

0 引言

开关磁阻电机(SRM)自从大批量应用以来, 一直受到用户的好评, 其在调速范围、结构及可控性等各方面具有很大的优势^[1-3], 是一种具有很高应用价值的电机系统。文献[4]研究表明,

SRM 运转过程中因机械结构问题引起边缘磁通交变, 导致电流的非线性, 并由此引发明显的振动转矩, 在低速时更为明显。

为了降低 SRM 转矩脉动的影响, 国内许多专家和学者对 SRM 的数学建模^[5-7]、传感器控制^[8-9]、磁路^[10]、振动抑制^[11]等方面展开了研究。

收稿日期: 2019-12-05; 收到修改稿日期: 2020-01-12

^{*} 基金项目: 浙江省教育厅科研项目(Y201330056); 浙江省自然科学基金项目(LY19E070004)

作者简介: 丁立军(1979—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电机振动检测、抑制及新型传感器技术。

此外,文献[12]构建了一种新的转矩-电流神经网络模型,用于得到恒转矩下的控制电流;文献[13]提出一种优化方法对外转子 SRM 进行了深入研究;文献[14]给出了一种预测控制方法,实现了对 SRM 的电流控制以实现恒速运动;文献[15]则针对机械结构对转矩的影响进行了深入的研究。

本文针对 SRM 的电磁振动转矩特性设计并建立了仿真模型,并且分别在角度位置控制(APC)、电流斩波控制(CCC)及电压斩波控制(CVC)3种控制模式下对选型电机进行电磁振动转矩和电流仿真。同时,搭建了 SRM 的振动转矩检测试验平台,采用角加速度传感器检测了电机的实际振动转矩情况,并对试验结果进行了分析讨论。

1 SRM 数学模型

本文研究了如实描述 SRM 的实际物理机理,选用 SRM 线性模型,不考虑电机的磁路非线性饱和特性,也不考虑铁心磁滞及涡流特性。

根据基本电路定理可以列出第 k 相电压的平衡方程:

$$u_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt} \quad (1)$$

$$\psi_k = L_k i_k \quad (2)$$

式中: i_k 、 u_k 、 R_k 分别为第 k 相定子电流、电压及电阻; ψ_k 、 L_k 分别为第 k 相定子磁链、电感(其中 L_k 与 i_k 及转子角度 θ 有关)。

结合式(1)和式(2)可得定子电压方程:

$$u_k = R_k i_k + \left(L_k + i_k \frac{\partial L_k}{\partial i_k} \right) \frac{di_k}{dt} + i_n \frac{\partial L_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

根据力学原理能够写出转矩的平衡方程为

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; D 为黏性摩擦因数; T_L 为负载转矩。

对第 k 相电磁转矩 T_{ek} 的计算需结合虚位移原理,可表示为

$$T_{ek} = \frac{\partial W(\theta, i_k)}{\partial \theta} \quad (5)$$

式(5)中,绕组磁共能 W 可表示为

$$W = \frac{1}{2} i_k^2 L_k \quad (6)$$

因此,SRM 电磁转矩可表示为

$$T_e = \sum_{k=1}^m T_{ek} = \sum_{k=1}^m \frac{1}{2} i_k^2 \frac{dL_k}{d\theta} \quad (7)$$

式中: m 为电机的相数。

由于 SRM 非线性的电感参数,转子在不同位置时的电感值不同,即电感与位置角之间的关系是非线性的。因此,即使通入恒定电流,瞬时转矩也会产生微小波动,造成 SRM 在非换相区间内瞬时转矩的非线性。更进一步,SRM 的电磁转矩会因电流换相出现不等程度的降落而产生对应的不等程度的脉动转矩。

2 振动转矩产生的机理分析

针对 SRM 转矩振动现象,结合电机数学方程及线性电感模型下相电流变化,详细分析 SRM 振动转矩产生的原因。

绕组的储能方程为

$$W' = \int_0^{\psi_k} i_k(\psi_k, \theta) d\psi_k \quad (8)$$

电机在任一运行点处的电磁转矩方程为

$$T_k = - \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{\psi_k = \text{const}} \quad (9)$$

结合式(8)和式(9),可以得到当绕组通入恒定电流 I 时,瞬时转矩 T_k :

$$T_k = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i_k = I} = \frac{\partial \int_0^I L_k(\theta, I) i_k di_k}{\partial \theta} \quad (10)$$

式中: W' 表示绕组的储能。

根据式(10)可写出 2 个不同转子位置 θ_0 和 θ_1 的瞬时转矩表达式如下:

$$\begin{cases} T_{k0} = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i_k = I} = \frac{\partial \int_0^I L_0(\theta, I) i_k di_k}{\partial \theta} \\ T_{k1} = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i_k = I} = \frac{\partial \int_0^I L_1(\theta, I) i_k di_k}{\partial \theta} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_0 、 L_1 为在转子位置 θ_0 、 θ_1 处的电感。

实际上,SRM 严重非线性的电感参数,导致

转子在 θ_0 、 θ_1 2 个不同位置处的电感值有所差异, 因此, 在通入恒定电流的条件下, 瞬时转矩 T_{k0} 和 T_{k1} 并不相等, 进而导致了在非换相区间内 SRM 瞬时转矩的非线性, 这是引起 SRM 的输出转矩微小波动的主要原因。

SRM 在换相阶段的电磁转矩最大降落, 导致输出转矩的最大脉动。根据电感的线性模型对 SRM 由于换相而造成的振动转矩从理论上进行定性分析。线性电感模型下采用 APC 方式的典型相电流波形如图 1 所示。

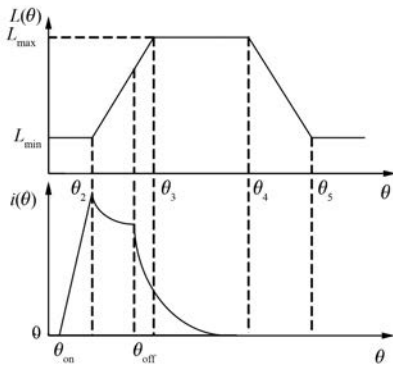


图 1 线性电感模型下采用角度位置控制方式的典型相电流波形

根据式(7)可知, SRM 的电磁转矩仅与相电流和电感对位置角的导数有关, 而在电感线性模型中电感对位置角的导数为常量。因此, 通过对相电流变化曲线的分析就能够对相绕组电磁转矩的变化趋势进行定性分析。根据图 1 的电感变化曲线, 从电感恒为最小值、电感上升区域、电感恒为最大值 3 个区域对电流变化特性进行分析。

区域 1: $0 < \theta < \theta_2$ 。

在该区域, 绕组电感值为 $L_{\min}$, 将磁链方程代入电压方程, 再考虑到电流的初值 $i_k(\theta_{\text{on}}) = 0$ 可以得到电流随位置变化的曲线为

$$i_k(\theta) = \frac{u_k(\theta - \theta_{\text{on}})}{L_{\min}\omega} \quad (12)$$

对式(12)求导可得 $di_k(\theta)/d\theta = \text{const}$ 为一个固定常量, 因此相电流在最小电感区域是以一个恒定的斜率直线上升, 又结合式(7)可知此时的电磁转矩为零。

区域 2: $\theta_2 < \theta < \theta_{\text{off}}$ 。

在该区域内电感 $L = L_{\min} + K(\theta - \theta_2)$, 此时电流函数和电流的变化率为

$$\begin{cases} i_k(\theta) = \frac{u_k(\theta - \theta_{\text{on}})}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)]} \\ \frac{di_k(\theta)}{d\theta} = \frac{u_k[L_{\min} + K(\theta_{\text{on}} - \theta_2)]}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)^2]} \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知, 当 $\theta_{\text{on}} < \theta_2 - L_{\min}/K$ 时, 有 $di_k(\theta)/d\theta < 0$, 因此瞬时转矩在该位置达到最大; 当 $\theta_{\text{on}} = \theta_2 - L_{\min}/K$ 时, 有 $di_k(\theta)/d\theta = 0$, 在电源电压不变的条件下瞬态转矩将会是一个稳态值; 当 $\theta_{\text{on}} > \theta_2 - L_{\min}/K$ 时, 有 $di_k(\theta)/d\theta > 0$, 瞬时转矩在该区域将会不断上升。

区域 3: $\theta_{\text{off}} < \theta < \theta_3$ 。

在该区域位置, 电感 $L = L_{\min} + K(\theta - \theta_2)$, 此时因为主开关器件关断和电流的续流特性, 绕组两端将施加反向电压 $-u_k$, 所以该区域内电流的变化率为

$$\frac{di_k(\theta)}{d\theta} = \frac{-u_k[L_{\min} + K(2\theta_{\text{off}} - \theta_2 - \theta_{\text{on}})]}{\omega[L_{\min} + K(\theta - \theta_2)^2]} \quad (14)$$

在结构上 SRM 转子极弧与电机的整个磁极相比, 相对较小, 即 $\theta_{\text{on}} < \theta_2$; 又因正常运转时其 $\theta_{\text{off}} \gg \theta_{\text{on}}$, 因此式(14)中的 $\theta_{\text{off}} - \theta_{\text{on}} - \theta_2 < 0$ 必然恒成立, 即瞬时转矩在该区域总是下降的。

综上所述, 可以发现 SRM 振动转矩产生的关键因素是换相区间阶段内电磁转矩的变化, 且也是振动转矩的最大降落点出现的阶段。

3 SRM 运行系统仿真

为了观测 SRM 工作时的电流变化和振动转矩情况, 采用 Simulink Library Browser 搭建了 SRM 运行仿真系统, 如图 2 所示。系统包括电机本体模块(三相 6/4 极式)、功率变换主电路模块、位置传感模块、转速信号输出模块和电流滞环模块。

3.1 电机本体模块

如图 3 所示, 电机本体采用 MATLAB/Simulink 自带的三相 6/4 极式的 SRM 模型, 额定功率设定为 60 kW, 定子绕组电阻设定为 1.2 Ω , 转动惯量 $J = 0.05$, 阻尼系数 $B = 0.02$, 电机初始位置和初始速度均设置为 0。

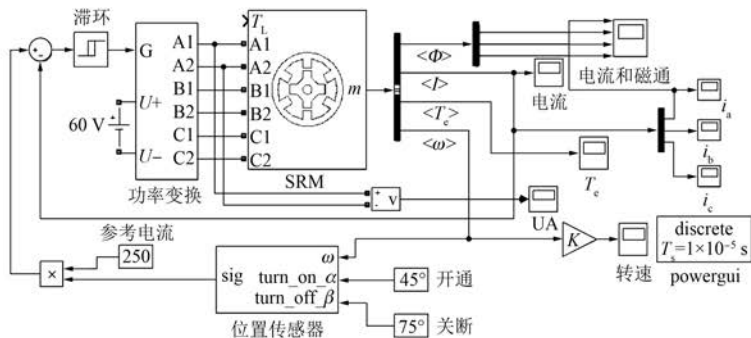


图2 SRM系统仿真框图

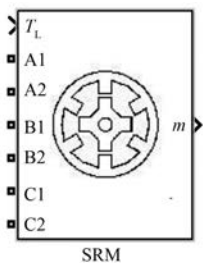


图3 SRM本体模块

3.2 功率变换主电路模块

功率变换主电路模块拓扑结构如图4所示。采用反向连续二极管 IGBT 作为关控器件,根据前向位置检测反馈信号来管控该开关元件的导通或断开,A1、A2、B1、B2、C1、C2 分别接电机三相绕组的两端,即可输出三相相电压 U_a 、 U_b 、 U_c 。

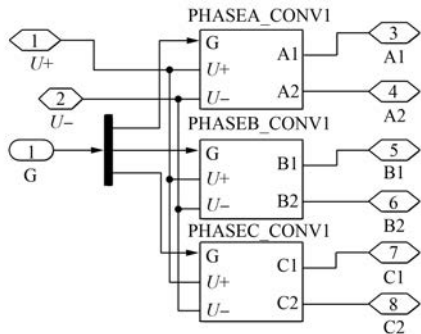


图4 功率变换主电路模块拓扑结构

3.3 位置传感器模块

设计的位置传感器模块如图5所示,与图2中的位置传感器模块对应,首先将反馈电机的角速度 ω 经过一个串联增益 $K=180/\pi$ 将弧度转换为角度单位,并经过一个积分环节后得到电机的位置角信息 θ ;再通过 mod 函数的取余功能将位

移角 θ 整合到 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,并利用后向积分器输出对应的三相磁极选择信号;最后比较整合后的位置角信息与开通角(2号端口)和关断角(3号端口)的大小,输出开通角小于关断角时对应的开通与关断信号。

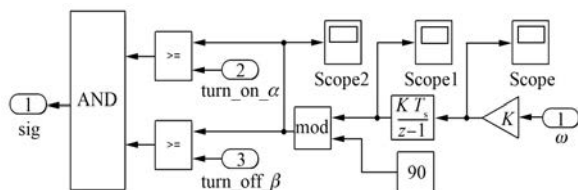


图5 位置传感器模块

3.4 电流滞环控制模块

设计的电流滞环控制模块如图6所示。首先给定开通和关断角,即 θ_{on} 、 θ_{off} ,并对绕组施加 U_x 斩波控制的电源电压;给定最大容许的参考相电流,如果电流值大于幅值上极限,则关断开关器件一直延续到该相电流衰减到参考电流值的下极限,然后再次驱动该相开关器件,使其电流继续上升。如此反复便可达到电流斩波的目的。

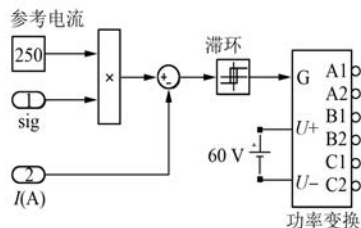


图6 电流滞环控制模块

3.5 仿真结果分析

APC 方式下电磁转矩与三相电流仿真波形如图7所示。从图7可以看出,以换相频率为主频的振动转矩非常明显。

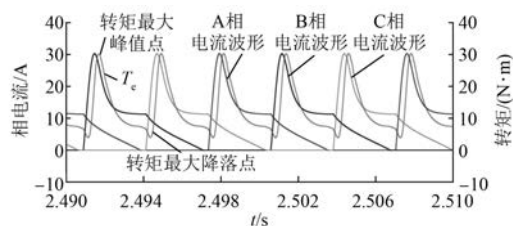


图7 APC方式下电磁转矩与三相电流仿真波形

CCC方式下的电磁转矩与三相电流仿真波形如图8所示。从图8可以看出,当SRM运行至稳态时,三相电流与APC方式下的有所不同,电流尖峰更小、稳定性更好,但仍存在明显的振动转矩。

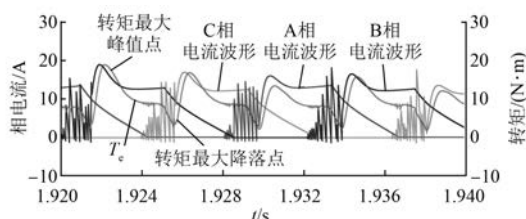


图8 CCC方式下电磁转矩与三相电流仿真波形

综上所述,以换相为主频的振动转矩确实是存在的,而且比较大,占主要成分。

4 SRM 振动转矩试验

SRM的振动测量试验平台实物图如图9所示。主要包括:SRM本体、磁粉制动器(用于产生负载转矩)、永磁旋转角加速度传感器、电机控制器和固定平台。

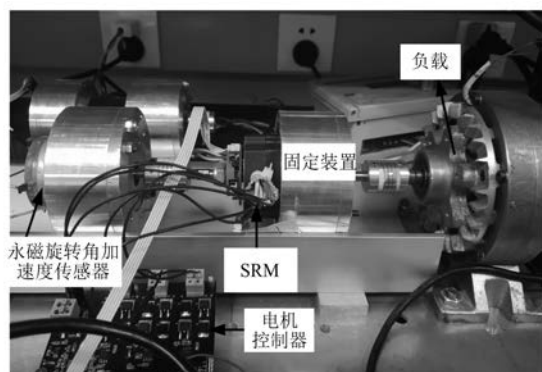


图9 试验测量平台实物图

为了保证测量效果真实可靠,SRM、负载电机、位置传感器的连接轴应该在同一直线上,将SRM

和永磁旋转角加速度传感器置于同一圆形套筒内进行固定,圆形套筒的外径保持相同且放在同一U型铝槽,能够可靠地保证同轴同心的连接。

试验中采用电压脉宽调制(PWM)斩波作为驱动器的控制方式,SRM的功率设置为150 W,电机绕组电阻设置为1.2 Ω ,工作电压为32 V,示波器采用最大频率可达2.5 GS/s、最大带宽可达100 MHz、型号为泰克MDO3014的高精度示波器,电源使用直流稳压电源。

试验时将双出轴SRM的一端同轴同心安装永磁旋转角加速度传感器,另一端同心同轴连接弹性联轴器和磁粉制动器,通过磁粉制动器施加一定的负载转矩,测量不同转速下电机正常运行时的振动转矩。图10、图11分别为在不同转速条件下所测得的振动转矩波形。从图10、图11可以看出,振动转矩明显。

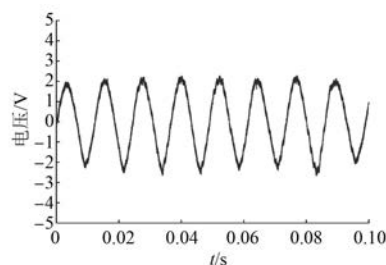


图10 转速为340 r/min时的振动转矩波形图

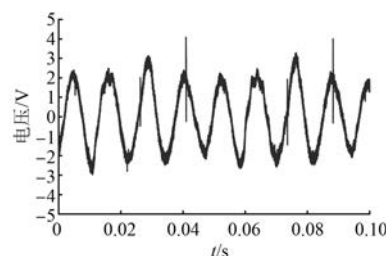


图11 转速为370 r/min时的振动转矩波形图

虽然该试验平台设计了合理的同轴同心连接,但不可避免地会存在一定程度的测量误差,此外,还有位置传感器一定程度不对称的三路触发信号,也会导致振动转矩波形的不对称性。

图12、图13分别为在APC方式下和CCC方式下的电磁转矩和三相电流波形图。通过分析图12、图13可知,APC方式下的振动转矩在换相频率处十分明显,而在CCC方式下的相电流虽然要比APC更平稳,但是振动转矩仍然十分明显。

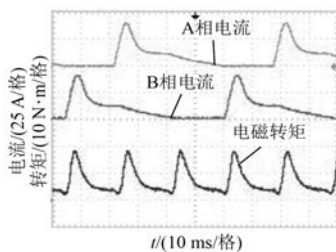


图 12 APC 方式下电磁转矩与三相电流试验波形

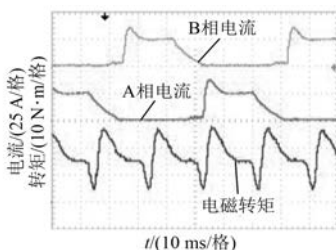


图 13 CCC 方式下电磁转矩与三相电流试验波形

5 结 语

通过 SRM 振动转矩试验研究以及对相电流和转矩波形的综合分析可知,SRM 由换相所产生的振幅明显的振动转矩呈周期性出现,并且脉振幅值的最大值与转矩降落最大值处的对称性非常高,这不利于电机平稳运行和高精度场合的推广应用。后续研究将从电机本体结构出发,提出概念清晰、易于实现的 SRM 振动转矩的抑制方法和低振动转矩的 SRM 结构模型。

【参考文献】

- [1] 蔡骏,向程,刘泽远,等.低压电动车开关磁阻电机隔离驱动技术[J].电机与控制应用,2019,46(2): 109.
- [2] CAO X, ZHOU J, LIU C, et al. Advanced control method for single-winding bearingless switched reluctance motor to reduce torque ripple and radial displacement [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(4): 1533.
- [3] 邵雨楠,蔡骏,向程,等.电动车开关磁阻电机驱动和保护控制策略研究[J].电机与控制应用,2019, 46(3): 76.
- [4] 吴红星.开关磁阻电机系统理论与控制技术[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [5] 李争,王鑫,杜磊,等.可偏转双定子开关磁阻式发电机磁热固耦合场分析[J].机电工程,2019, 36(9): 1001.
- [6] 张慧,潘再平.开关磁阻发电机励磁模式的理论分析与仿真[J].太阳能学报,2004,25(2): 162.
- [7] 左曙光,刘明田,胡胜龙.考虑铁芯磁饱和的开关磁阻电机电感及转矩解析建模[J].西安交通大学学报,2019,53(7): 118.
- [8] 张磊,刘闯,王云林,等.开关磁阻电机变双电流阈值的无位置传感器技术[J].中国电机工程学报,2014,34(27): 4683.
- [9] 熊树,蒯松岩,夏新祥,等.基于磁链级数模型的开关磁阻电机无位置传感器控制[J].微电机,2019, 52(6): 45.
- [10] 高金行,陈峥,林辉.开关磁阻电机磁路优化设计及性能分析[J].微电机,2008,41(12): 67.
- [11] 王宁黎.开关磁阻电机振动转矩抑制方法的研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2019.
- [12] 党选举,陈童,姜辉,等.重构神经网络模型及开关磁阻电机恒转矩控制[J].组合机床与自动化加工技术,2019(9): 72.
- [13] 黄朝志,郭桂秀,石王丰,等.外转子开关磁阻电机的转矩性能优化[J].微电机,2019,52(8): 11.
- [14] 李孟秋,王文兵,李波,等.基于电流斜率的开关磁阻电机转矩脉动研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(8): 59.
- [15] SAHIN C, AMAC A E, KARACOR M, et al. Reducing torque ripple of switched reluctance machines by relocation of rotor moulding clinches[J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(9): 753.