

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.016

主动配电网实时经济分配的一致性 协同控制策略研究*

曹 勇, 李培恺, 辛焕海*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对主动配电网中大规模光伏发电机、风力发电机等分布式电源以及大容量储能系统接入后的经济运行问题,同时为了提高配电网控制系统的实时性、鲁棒性与可扩展性,对主动配电网多电源接入后负荷的实时经济分配问题进行了研究,提出了一种一致性协同控制策略。该协同控制策略采用一致性算法,在各个电源点只得到自身控制器信息以及部分相邻电源控制器信息的情况下实现了自治控制,并最终使整个系统逐渐趋向于最优经济运行点。研究表明,所提实时经济分配的一致性协同控制策略能够有效地实现负荷有功功率在各个电源点之间的实时经济最优分配,同时能够处理峰谷电价、新能源出力波动、负荷波动等不同运行工况。

关键词:经济分配;协同控制;一致性算法

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0633-06

Consensus-based collaborative control strategy of real-time economic dispatch in active distribution network

CAO Yong, LI Pei-kai, XIN Huan-hai

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving the economic operation problem when large scale of distributed energy resources (such as photovoltaic, wind power and energy storage) integrated into distribution network and to improve the real-time ability, robustness and flexible scalability of the control strategy, a distributed consensus-based collaborative control strategy was proposed. The power sources were controlled in a distributed way. The optimal operation point was realized in the condition that each power source could only collect information from its own and its neighbors. The results indicate that the proposed strategy is effect in real-time economic dispatch in cases of peak-valley price, intermittency of the renewable energy and power fluctuation of the load.

Key words: economic dispatch; collaborative control; consensus-based algorithm

0 引 言

配电网中分布式电源渗透率的提高以及新能源固有的不确定性给配电网的调度运行带来了极大挑战,主动配电网(active distribution network, ADN)技术应运而生^[1]。同时,分布式电源的大量接入,也使得配电网从无源网络转变成有源网络,配电网负荷在各电

源点之间的经济分配问题日益突出。

传统的最优经济分配方法主要有经典数学方法和人工智能方法两大类^[2-4]。这些方法均是建立在全局信息采集以及发电量、负荷量预测的基础上的。针对配电网中的大量分布式电源,这些方法的运用显然存在其局限性。

分布式协同控制策略相比于集中式控制策略具有

收稿日期:2016-11-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2015AA050202);国家自然科学基金资助项目(51177146)

作者简介:曹勇(1992-),男,浙江嵊州人,硕士研究生,主要从事主动配电网以及分布式控制方面的研究. E-mail:21410181@zju.edu.cn

通信联系人:辛焕海,男,教授,博士生导师. E-mail:xinhh@zju.edu.cn

更好的实时性、鲁棒性以及系统可扩展性,同时也具有更灵活的通信网络布置方式^[5]。因此,利用本地信息以及局部通信进行优化控制的分布式方法得到日益广泛的关注与研究。文献[6-7]提出一种在没有任何通信链路,仅依靠电力系统频率的天然耦合来完全分散地实现最优的经济分配,但其收敛速度相对缓慢。文献[8-9]的作者使用成本微增率作为状态量,利用一致性算法使各发电机成本微增率趋于一致,从而分布式地实现了系统的经济分配。但这些分布式控制方式考虑的电源种类单一,同时,上述算法也未有效解决发电机容量约束问题。文献[10]通过引入额外的状态量解决了发电机容量约束问题,但是该算法需要对多个状态变量进行多次循环迭代才能达到控制目标。此外,也有学者研究考虑新能源出力随机性以及社会效益等情况的分布式经济分配算法,但这些算法同时也大大增加了算法的复杂度^[11-12]。

在上述背景下,本研究将基于平均一致理论,提出一种一致性协同控制策略,在没有控制中心的情况下分布式地解决配电网中各类电源有功功率的最优经济分配问题。

1 主动配电网信息物理分层架构

信息物理系统(cyber physical system, CPS)是通过信息系统充分开发应用,来优化物理系统运行效果和性能^[13]。主动配电网是一个典型的电力 CPS,主动配电网物理信息双层结构如图 1 所示。

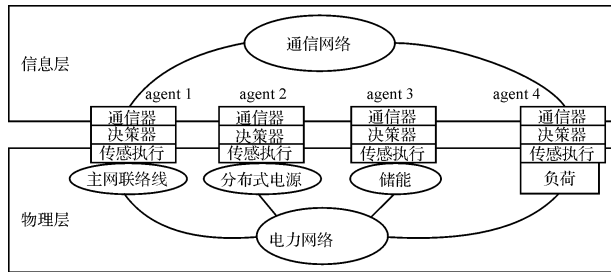


图 1 主动配电网物理信息双层结构

由图 1 可知,物理层包括各类电力设备和电力网络,信息层包括通信节点以及通信网络。信息层与物理层之间通过智能体相互联接。智能体由通信器、决策器以及传感器与执行器组成。每一个智能体都能根据通信器接收到的以及传感器采集的信息由决策器进行自主计算,计算得到的控制指令由执行器执行,外送信息由通信器发送给相邻智能体。

本研究中用无向图 $G = (V, E, A)$ 描述信息层网络拓扑,无向图 G 中: V —通信节点, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$; E —通信链路, $E \subseteq V \times V$; A —邻接矩阵, $A = [a_{ij}] \in$

$R^{n \times n}$ 。

邻接矩阵 A 中: a_{ij} —边 (v_j, v_i) 的权重,如果 $(v_j, v_i) \in E$,则有 $a_{ij} = 1$,否则 $a_{ij} = 0$; N_i —agent i 邻居智能体的集合, $N_i = \{j | (v_j, v_i) \in E\}$ 。

D —有向图 G 的度矩阵, $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$, 其中: d_i —agent i 邻居智能体的个数, $d_i = \sum_{i \neq j} a_{ij}$; L —系统的拉普拉斯矩阵, $L = [l_{ij}] = D - A$ 。

2 主动配电网实时经济分配模型

相比于微网,主动配电网实时经济分配问题的目标函数的构成以及约束条件均发生了变化。

2.1 目标函数

以柴油机、燃气轮机、储能以及主网购电的运行成本最小为目标,目标函数可表示为:

$$\text{Min} \sum_{i \in \Omega_G} C_{G,i}(P_{G,i}) + \sum_{i \in \Omega_B} C_{B,i}(P_{B,i}) + C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}) \quad (1)$$

式中: Ω_G, Ω_B —同步机与储能单元的集合; $C_{G,i}(P_{G,i})$, $C_{B,i}(P_{B,i})$ —同步机与储能的成本函数^[14]; $C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}})$ —当前的主网购电成本。

$$\begin{cases} C_{G,i}(P_{G,i}) = \alpha_{G,i} + \beta_{G,i}P_{G,i} + \gamma_{G,i}P_{G,i}^2 \\ C_{B,i}(P_{B,i}) = \gamma_{B,i}P_{G,i}^2 \\ C_{\text{grid}}(P_{\text{grid}}) = \text{price} \times P_{\text{grid}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{G,i}$ —同步电机出力; $\alpha_{G,i}, \beta_{G,i}, \gamma_{G,i}$ —同步电机成本系数; $P_{B,i}$ —储能出力, 放电为正, 充电为负; $\gamma_{B,i}$ —储能成本系数; P_{grid} —主网注入配网的功率; price —主网节点成本微增率。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。

$$\sum_{i \in \Omega_R} P_{R,i} + \sum_{i \in \Omega_G} P_{G,i} + \sum_{i \in \Omega_B} P_{B,i} + P_{\text{grid}} = \sum_{i \in \Omega} P_{d,i} \quad (3)$$

式中: Ω_R —所有不可控可再生能源发电机组的集合; $P_{R,i}$ —可再生发电机的有功出力; Ω —所有单元的集合; $P_{d,i}$ —负荷。

(2) 同步机运行约束。

配网中的同步机大部分为柴油机或汽轮机,其相应速度较快,所以本研究不考虑同步发电机的爬坡约束,只考虑同步发电机的功率上下限约束:

$$P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \quad (4)$$

式中: $P_{G,i}^{\min}$ —同步机出力下限, $P_{G,i}^{\max}$ —同步机出力上限。

(3) 储能单元运行约束。

首先,储能单元必须考虑储能的极大可充放电容量限制, SOC 是用于防止储能过度充放电的重要指标^[15]:

$$S_{soci}^{\min} \leq S_{soci}(k) \leq S_{soci}^{\max} \quad (5)$$

式中: $S_{soci}(k)$ — 储能在 k 时刻的荷电状态; $S_{soci}^{\min}, S_{soci}^{\max}$ — 储能允许的极限荷电量。

不考虑充放电损耗,荷电状态的方程为:

$$S_{soci}(k) = S_{soci}(k-1) - P_{B,i}(k) \frac{\Delta t}{E_i} \quad (6)$$

式中: Δt — 时间步长, E_i — 储能的总容量。

此外,与同步电机类似,储能也受到出力上、下限约束,表示为:

$$P_{B,i}^{\min} \leq P_{B,i} \leq P_{B,i}^{\max} \quad (7)$$

式中: $P_{B,i}^{\min}, P_{B,i}^{\max}$ — 储能充放电上、下限。

(4) 其他约束。

可再生能源发电机组的出力由当时的环境条件决定,为不可控量。另外,配电网一般要求不向主网倒送功率,即主网注入配网有功功率 $P_{grid} \geq 0$ 。

3 经济分配的协同控制算法

在协同控制算法实施时,各智能体按照本地信息以及相邻智能体信息进行数据处理,生成控制指令由执行器调整物理系统出力;同时处理生成外送信号,由通信器向相邻智能体发送,形成闭环系统。

3.1 基本控制规则

系统中每一个智能体(除监控馈线的智能体外)采用如文献[16]所示的离散时间的一致性协议:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij}(x_i(k) - x_j(k)) \quad (8)$$

式中: ε — 一致性协议的迭代系数, $\varepsilon > 0$; $x_i(k)$ — 智能体 k 时刻的状态值。

从上式可以看出,当每一个智能体的状态量趋于一致时,系统趋于稳定。式(8)一致性协议可表述为迭代格式:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{W}\mathbf{X}(k) \quad (9)$$

式中: k — 迭代步数, $\mathbf{X}$ — 状态值构成的矩阵, $\mathbf{W}$ — 迭代矩阵。

迭代矩阵如下:

$$\mathbf{W} = \mathbf{I} - \varepsilon \mathbf{L} \quad (10)$$

经过足够多次的迭代,系统的状态量会收敛到一个固定值 $\tilde{x}_i$ 。一般采用等微增率原则来解决电力系统经济分配问题,表达如下:

$$\begin{cases} \lambda_{c,i} = \lambda^*, P_{c,i}^{\min} \leq P_{c,i} \leq P_{c,i}^{\max} \\ \lambda_{c,i} < \lambda^*, P_{c,i} = P_{c,i}^{\max} \\ \lambda_{c,i} > \lambda^*, P_{c,i} = P_{c,i}^{\min} \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ^* — 边际成本微增率; $\lambda_{c,i}$ — 可调节单元 i 的成本微增率,即成本函数对功率求导; c — 功率可调节单元,即同步机、储能以及主网。

为简洁起见,在本研究后面的叙述中,所有下标 i 都以智能体的序号为标准,不再进行分类处理。将成本微增率映射到一致性协议中的状态变量,即可通过分布式控制的手段得到边际成本微增率,从而使配电网整个系统达到经济最优。

3.2 分布式协同控制算法

选择成本微增率 λ 为状态量进行一致性迭代时,必须加入一项调整项来反馈修正,使得最终的结果能够满足控制目标的需求。在配电网运行时,有主网的频率电压支撑,主网的支撑作用能够使配电网自主地满足功率平衡条件,所以通过利用主网的支撑作用可以完成配电网的功率平衡。同时,通过联络线智能体实时监控联络线的功率变化与主网的节点成本微增率并反馈给与之相连的智能体,用以生成调整项完成修正过程。主体算法如下:

(1) 对自身信息以及邻居智能体的成本微增率信息按照一致性协议进行计算:

$$\lambda_i(k+1) = \lambda_i(k) + \varepsilon \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\lambda_i(k) - \lambda_j(k)) + \mu \Delta f \quad (12)$$

式中: $\lambda_i(k)$ — 智能体 k 时刻的成本微增率, μ — 调整项系数, Δf — 调整项。

如果该智能体与联络线智能体通信连接, $\mu > 0$,否则 $\mu = 0$ 。

(2) 根据 $\lambda_i(k+1)$ 调节物理设备控制命令。不同类型的发电机调整方式如下,主网根据功率不平衡量调节注入功率。

柴油机以及燃气轮机等同步机:

$$P_i(k+1) = \frac{\lambda_i(k+1) - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (13)$$

储能:

$$P_i(k+1) = \frac{\lambda_i(k+1)}{2\gamma_i} \quad (14)$$

(3) 系统调整项 $\mu \Delta f$ 。配电网中任何不确定因素均可能产生功率偏差,而且考虑配电网经济运行时必须考虑主网的节点成本微增率,所以需要引入一个调整项来处理系统产生的功率偏差以及主网电价对配电网经济运行的影响。配电网中的频率与电压支撑由主网完成,主网对于配网可等效为无穷大电网,即任何的功率偏差都可以通过主网得到补充且配网负荷变化不影响主网成本微增率。调整项如下:

$$\Delta f = P_g(\text{price} - \lambda_i(k)) \quad (15)$$

从式(15)可以看出,当主网注入配网功率为0,或者配网的成本微增率与主网相等时,调整项为0。主网注入功率为0,说明当前运行条件下主网内部电源能够以低于主网的成本维持功率平衡,配网的成本微增

率与主网相等说明当前配网以价格 $price$ 向主网购电。电网电价与联络线功率都由监控联络线的智能体获得,调整项只存在于与之相连的智能体中。

3.3 电源容量约束的处理

上一节对分布式经济分配控制策略进行完整地描述。为了使上述策略能够顺利连续地运行,本研究需要对发电机成本微增率函数进行一些调整:

(1)同步机成本微增率的调整。燃气轮机以及柴油机等同步机的成本函数为二次函数,所以其成本微增率函数为起始点不在远点的一次函数。一般情况下只需对接近出力上、下限时成本微增率进行适当调整,斜率适当增加,使其在接近功率上、下限时不会越限,同步机成本微增率调整前后对照图如图 2 所示。

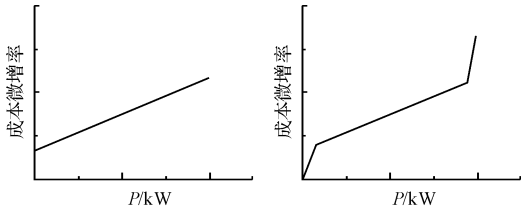


图 2 同步机成本微增率调整前后对照图

(2)储能以及可再生能源微增率的调整。储能的成本函数为过原点的二次函数,所以其成本微增率为过原点的一次函数,而且其斜率一般比同步电机的成本微增率函数的斜率大很多,也就是说当储能的出力较大时,其成本微增率很大,而当储能出力很小时,其成本微增率很小,所以一般无需对其成本微增率函数进行调整,便可满足迭代要求。另外,可再生能源的出力不可调整,且其成本仅为少量的设备维护费,成本微增率很小,所以一般保证其按最大功率出力。

4 仿真算例

本研究以一个 14 节点小型主动配电网为例验证所提算法的正确性,配网一次结构以及智能体通信结构如图 3 所示。

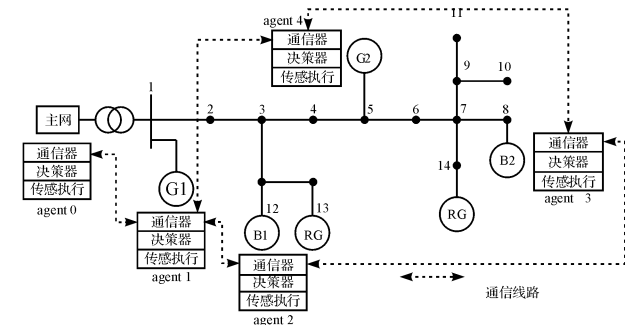


图 3 简化 14 节点配电系统

整个配网包括两台小型同步发电机(G1/G2)、两

处储能(B1/B2)以及两处可再生能源发电机组组成,配电网通过节点 1 连接到主网中,agent0 为联络线智能体,负责向 agent1 传递主网电价以及联络线功率信号。迭代系数 ε 取为 $1/3$,调整项系数 μ 取为 0.05 。agent 之间的通信为双向通信,通信步长为 1 s ,即两次通信之间的时间间隔为 1 s 。具体的电源及主网参数如表 1 所示。

表 1 主动配电网各电源参数

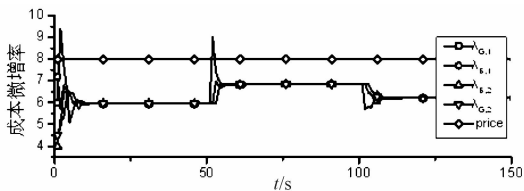
电源号	α	β	γ	$P_i^{\min}/\text{kW}$	$P_i^{\max}/\text{kW}$
G1	0	2.0	0.04	0	100
G2	0	2.0	0.025	0	100
B1	0	0	0.18	-30	30
B2	0	0	0.1	-50	50
grid	主网成本微增率:峰 $price = 8$,谷 $price = 5$				

从上一节的叙述中可知,为了保证算法收敛且算法运行过程连续,需要对同步电机的成本微增率作适当调整,从表 1 中可以看出,G1 的成本微增率在满负荷运行时比较大,满足连续运行调节,G2 的成本微增率在满负荷运行时为 7,小于峰时主网成本微增率,所以需要进行调整,调整为分段函数:

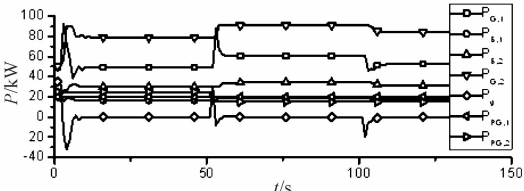
$$\begin{cases} \lambda = 0.05P_{G,2} + 2.0, P_{G,2} < 90 \\ \lambda = 0.35P_{G,2} - 25, P_{G,2} > 90 \end{cases} \quad (16)$$

4.1 算例 1:主网峰时电价

该算例假设主网处于峰时成本微增率,此时的主网的成本微增率 $price = 8$ 。不考虑线路网损,假设初始状态可再生能源出力 45 kW ,两台同步机出力分别为 50 kW ,两台储能出力分别为 20 kW ,向主网购电 35 kW ,此时负荷为 220 kW 。峰时电价仿真图如图 4 所示。



(a) 成本微增率曲线



(b) 电源出力曲线

图 4 峰时电价仿真图

如图 4(a)所示,系统从 0 时刻投入使用分布式经济分配算法,配电网内部的电源能够较快速地达到一致,同时由于电网电价较高,而此时电网内部的

电源能够以较低的成本微增率满足配电网的负荷,所以如图4(b)所示,配网向主网的购电量为0。50 s时,配电网负荷增加20 kW,同时可再生能源(RG2)出力下降10 kW,首先由主网补偿这部分功率,所以在50 s时,主网功率有一个波动,但是快速分摊到各个发电机组。需要注意的是,此时若按照调整前的微增率函数,G2是越上限的,本研究所提的微增率函数调整方法有效把G2的出力有效控制在略小于极限的位置。100 s时,配电网负荷减少20 kW,配网各个电源能够快速调整出力并达到新的等微增率的状态。从图4(a)也可以看出,配电网在用电高峰期通过内部电源出力的调整以及分布式协同控制策略的运用,有效降低配电网运行成本。

4.2 算例2:主网谷时电价

该算例的仿真假设条件与算例1完全一致,此时的主网微增率为 $price = 5$ 。假设初始状态可再生能源出力30 kW,两台同步机出力分别为30 kW,两台储能出力分别为20 kW,向主网购电20 kW,此时负荷为150 kW。谷时电价仿真图如图5所示。

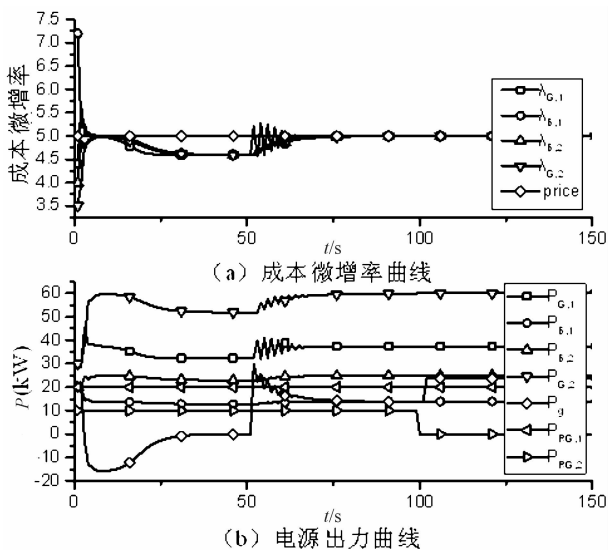


图5 谷时电价仿真图

同样系统在0时刻投入协同控制策略,如图5(a)所示,经过约20 s的迭代过程后,配电网达到经济最优,此时由于配电网负荷量较小,内部电源能以更小成本微增率满足负荷,所以此时向主网购电量为0。50 s时,系统负荷增加30 kW,配电网内部电源不能够在小于主网电价的情况下满足配电网负荷,所以配电网此时内部电源按照主网的成本微增率进行出力,同时向主网购电。100 s时,可再生能源机组RG2出力将为0,成本微增率曲线如图5(a)所示,此时增加配网内部机组出力必定会导致其成本微增率高于电网微增率,所以配电网内部电源的出力并没有增加,而是提高向

主网的购电量,电源出力曲线如图5(b)所示。

5 结束语

本研究通过对主网的节点电价函数以及燃气轮机、柴油机等同步机的成本微增率函数的微调,以及利用主网对配网的频率支撑作用,在不增加计算量的前提下,有效处理主动配电网中负荷波动、可再生能源出力波动以及主网峰谷电价变化等多种运行工况。仿真验证说明了该策略在实现配电网实时经济最优控制中的优势与应用前景。

本研究目前只考虑了某一时间截面上的经济最优,接下来将在考虑储能充放电状态以及可控负荷工作状态的基础上,研究如何分布式地实现某一时间段内配电网的最优经济分配。

参考文献(References):

- [1] 尤毅,刘东,钟清,等.多时间尺度下基于主动配电网的分布式电源协调控制[J].电力系统自动化,2014,38(9):192-203.
- [2] 蒙文川,邱家驹,卞晓猛.电力系统经济负荷分配的人工免疫混沌优化算法[J].电网技术,2006,23(30):41-44.
- [3] PARK J, JEONG Y, SHIN J, et al. An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 25(1):156-166.
- [4] 朱永胜,王杰,瞿博阳,等.含风电场的多目标动态环境经济调度[J].电网技术,2015,39(5):1315-1322.
- [5] XIN H, GAN D, LI N, et al. Virtual power plant-based distributed control strategy for multiple distributed generators[J]. Iet Control Theory & Applications, 2013, 7(1):90-98.
- [6] MUDUMBAI R, DASGUPTA S, CHO B B. Distributed control for optimal economic dispatch of a network of heterogeneous power generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1750-1760.
- [7] 赵睿,章雷其,辛焕海,等.微网孤岛运行的分散自趋优控制策略[J].电力系统自动化,2015,29(21):30-36.
- [8] ZHANG Z, CHOW M Y. Convergence analysis of the incremental cost consensus algorithm under different communication network topologies in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):1761-1768.
- [9] YANG S, TAN S, XU J X. Consensus based approach for economic dispatch problem in a smart grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4416-4426.
- [10] CHEN G, LEWIS F L, FENG E N, et al. Distributed optimal active power control of multiple generation systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11):1-1.

- [11] GUO F, WENG, MAO J, et al. Distributed economic dispatch for smart grids with random wind power[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2015, 7(3): 1572-1583.
- [12] ZHANG W, XU Y, LIU W, et al. Distributed online optimal energy management for smart grids[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2015, 11(3): 1-1.
- [13] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 基于信息物理系统的孤岛微网实时调度的一致性协同算法[J]. 中国电机工程学报. 2016, 36(6): 1471-1480.
- [14] XU Yin liang, LI Zhi cheng. Distributed optimal resource management based on the consensus algorithm in a micro-

grid[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 2015, 62(4): 2584-2592.

- [15] 刘柏良, 黄学良, 李军. 计及可时移负荷的海岛微网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4250-4258.
- [16] OLFATI-SABER R, FAX A, MURRAY R M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems [J]. **Proceedings of the IEEE**, 2007, 95(1): 215-233.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

曹 勇, 李培恺, 辛焕海. 主动配电网实时经济分配的一致性协同控制策略研究[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 633-638.

CAO Yong, LI Pei-kai, XIN Huan-hai. Consensus-based collaborative control strategy of real-time economic dispatch in active distribution network[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(6): 633-638.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 616 页)

转速曲线如图 11 所示。

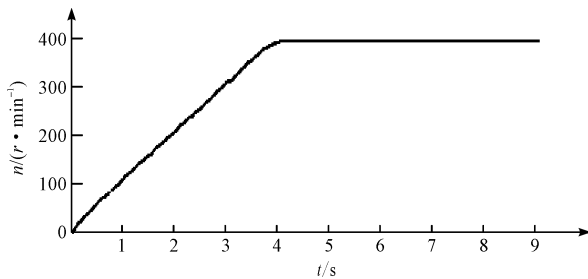


图 11 110HPM 型电动机转速曲线

由图 10、图 11 可见, 电机转速达到 400 r/min 时, 电流 i_d 达到实现深度弱磁所需最大电流, 弱磁效果好。实验结果表明, 混合式结构对永磁同步电机弱磁性能有明显的提升。

5 结束语

本研究首先介绍了混合式永磁同步电机的结构特点, 然后分析得出传统永磁同步电机弱磁性能不佳本质上是因为直轴电流的扩展范围不足, 也即电枢磁势和转子励磁磁势的不对等。通过分析混合式永磁电机结构可知混合式永磁电机永磁体用量少, 短路电流小, 因此混合式结构可以有效提升永磁同步电机的弱磁性能, 通过实验验证了理论分析的正确性。

后续的研究应进一步关注提高混合式结构的比转矩系数, 采用增强型、超强型混合式等结构^[7-10], 使其在永磁同步电动机应用的领域中, 找到更多的发展空间。

参考文献 (References):

- [1] 杨成峰, 林鹤云, 郭 健. 混合励磁爪极同步电机磁路结构及其调磁性能[J]. 微特电机, 2007(7): 12-15.
- [2] 陈尔奎, 颜景浩, 包日南, 等. V 型永磁体分段转子结构的弱磁性能分析[J]. 电机与控制应用, 2013(12): 5-8.
- [3] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Effect and compensation of magnetic saturation in flux-weakening controlled permanent magnet synchronous motor drives [J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 1994, 30(6): 1632-1637.
- [4] 顾其善. 永磁转子感应子式同步电动机[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1978(21): 71-85.
- [5] 顾其善. 永磁转子感应子式同步电动机的气隙磁场[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1979(3): 88-97.
- [6] 王宗培, 陈敏祥, 任雷. 超强型混合式交流同步电动机[J]. 微电机, 2015(5): 1-9.
- [7] 包西平, 吉 智, 朱 涛. 高性能永磁同步伺服系统研究现状及发展[J]. 微电机, 2014(7): 84-87.
- [8] 陈敏祥, 阮国贤, 关仁元, 等. 步进电动机——发展之路与产品开发初探[J]. 微电机, 2012(11): 67-74.
- [9] 王宗培, 李兴根. 增强型混合式步进电动机的机理[J]. 微电机, 1991(5): 4-7.
- [10] 王宗培, 任 雷, 陈敏祥, 等. 步进电动机主流系列产品之升级——超强型混合式步进电动机[J]. 微电机, 2013(8): 1-5.

[编辑: 张 豪]