考虑用车紧急度的电动汽车充放电模糊逻辑控制策略

陈丽丹1,欧阳慧林2

(1. 华南理工大学广州学院 电气工程学院,广东 广州 510800;2. 东莞电力设计院系统部,广东 东莞 523413)

摘要:针对电动汽车(EV)实时充放电控制问题,提出一种基于模糊逻辑控制的分布式EV充放电功率实时控 制方法。根据EV当前时间所需补充的电量和剩余停车时间内可获得的最大充电量关系建立用车紧急度模 型;由节点预设参考电压和实际测量电压获得当前时刻的节点电压偏差量;考虑用车紧急度、节点电压偏差 和实时电价3个因素设计EV的实时充放电功率模糊逻辑控制器,并提出基于中位数-平均绝对离差的实时 电价模糊化方法;与无序充电、平均充电功率控制、随机控制策略进行对比仿真分析,验证所提方法能保证节 点电压运行在控制水平范围,并能有效削峰填谷,降低网络损耗和用户成本。

关键词:电动汽车;用车紧急度;模糊逻辑控制;充放电功率;实时电价 中图分类号:U 469.72

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004018

0 引言

随着电动汽车(EV)不断普及使用,大量EV连 接到电网,其充电、放电行为将对电网产生不可忽视 的影响^[1]。研究表明,一方面,EV无序充电将对电 网造成负面影响,如电压偏差、负荷尖峰、网络损耗 增加、线路 / 变压器过载等[2-3];另一方面,随着智能 电网、车辆到电网(V2G)技术的不断成熟,EV与电网 之间的交互将为电网和用户带来有利效益^[4]。

对于EV的充电和放电控制管理,近年来国内外 学者开展了大量的研究并取得了丰富的研究成果, 文献[5-6]综述了相关控制策略,可概括为集中式、 分散式和两者相协调的控制管理方式^[7],以实现技 术、经济等控制目标以及在日前-滚动-实时时间尺 度内进行优化调度等。其中,在优化实时充放电功 率方面,文献[8]在常规充电优化方法中加入了未入 网EV的充电预测模型,提出计及充电预测的实时充 电优化模型,并通过滚动优化求解得到入网EV的实 时优化充电功率;文献[9]采用排队模型预测未来短 时间内EV的充电负荷需求,从而为充放电决策提供 准实时信息;文献[10-11]采用基于模型预测控制 MPC(Model Predictive Control)的方法对EV进行实 时充电控制,对未来一定时间窗内的EV情况、电价 等进行预测,继而进行滚动优化获得当前时间的决 策结果,其中文献[10]以预测电价为基础,文献[11] 未考虑动态电价因素;文献[12]在日前阶段基于EV 和光伏出力的预测结果制定未来一天的调度策略,

收稿日期:2019-07-16;修回日期:2020-02-20

基金项目:国家留学基金资助项目(201708440511);东莞电 力专项电网规划选址选线研究项目(031900Q000170002) Project supported by China Scholarship Council Funds(2017-08440511) and the Research Program of Site and Line Selection of Network Planning of Dongguan Electric Power Special Project(031900QQ00170002)

在实时阶段同样基于 MPC 方法进行日内实时滚动 优化,实现了对光伏功率的良好平抑效果;文献[13] 提出了一种基于分布式实时滚动交易式控制(TC) 的充电管理方法,能统一协调EV和多种柔性负荷, 降低整体阻塞水平,但未包含V2G放电策略。总结 而言,针对EV实时充放电的调控问题,一些优化方 法的充电协调有效性需有准确的EV在未来的充电 需求预测为前提^[14],但实际当中EV的充电需求预 测本身就存在误差;而基于 MPC 方法的控制效果一 方面同样依赖于预测的准确性,另一方面预测的时 间窗选取对优化结果也有较大的影响。

同时,可以自主进行控制的模糊逻辑控制FLC (Fuzzy Logical Control)是一种不必建立数学模型, 而是采用语言规则表示方法、由模糊推理进行决策 的高级控制策略,因此也被应用于EV的充放电控 制[15-20]。文献[15]在可调度时段内用模糊控制决策 方法根据当前电网的供需情况以及接入EV的荷电 状态(SOC)实现EV的充放电功率控制:文献[16-17] 设计了V2G控制器和充电站控制器,采用模糊逻辑 进行电压稳定和峰值需求控制管理;文献[18]设计 了用于停车场基础设施的模糊逻辑功率流控制器; 文献[19]将模糊逻辑控制方法用于EV充电器,将 EV的电池荷电状态和用户充电结束时间偏好作为 充电功率模糊控制的2个输入量;文献[20]提出了 一种考虑EV电池荷电状态和系统电压2个因素的 模糊控制器。但是上述研究存在如下问题:①文献 [16-17]未对单辆EV的具体充放电控制展开讨论; ②文献[18]中的充电功率取决于下一时段的预测光 伏发电输出功率、EV的功率需求以及能量价格,这 意味着需要准确的电力需求预测模型来进行估算; ③文献[19-20]所设计的2种模糊控制器考虑的因素 之一均是当前 EV 的荷电状态水平,但该状态值的大 小无法直接反映用户充电的紧迫性,例如,即使车辆

当前的荷电状态非常低,但若其具有较长的驻留时间,在当前电压低于控制电压水平的情况下,EV不应在当前时间充电,而应采取延迟充电或降低充电功率将更合理;④文献[15-20]没有考虑电价因素,但是经济性正是EV用户较为关注的方面。

由上述分析可知,EV 实时充放电控制问题仍需 深入研究。本文在实时电价(RTP)的背景下,基于 模糊逻辑控制方法开展了EV 充放电功率的实时控 制研究,通过分析EV 用户的用车紧急度,设计了考 虑用车紧急度、节点电压偏差和实时电价3个因素 的基于模糊逻辑的EV 充放电功率控制器,其目的是 降低电网高峰负荷、峰谷差、网络损耗,同时实现满 足车主的行驶需求并降低其充电成本。

1 分布式EV的充放电控制框架

EV的充放电控制,从电网角度需满足配电系统 的负荷、电压等运行要求,从EV车主角度需满足其 使用要求,同时降低用车成本[21],本文所提控制方案 以车、网相互协商的机制为前提,电网将对参与该 控制方案的EV给予一定的经济补偿。设计模糊逻 辑控制器时着重考虑3个关键因素,包括连接点 处的电压偏差(用 Δv 表示)、用车紧急度(用 λ^{cu} 表 示)和实时电价信号。图1给出了EV充放电控制框 架,其为一种不需要复杂通信的分布式方案,EV 的实时充放电功率控制由充放电设备(EVSE)实 施,模糊逻辑控制器嵌入安装于 EVSE 内,其设计 将在第2节中进行详细说明。假设一天的时间集 合为*H* = {1, 2, …, *t*, …, *T*}, 配电网节点集合为*N* = {1,2,…,*i*,…,*I*},EVSE连接于配电网节点,实际上 每个节点可能接有多台EVSE,连接点的实际运行电 压值 vi, 由未来智能电网中含双向计量智能电表的 高级计量系统(AMI)获得,节点i处的运行控制参考 电压由调度员预设,记为 v_i^{ref} 。



图 1 基于模糊逻辑控制的EV充放电功率控制框架 Fig.1 FLC-based EV charging and discharging power control architecture

图1中EV抵达后(假设接入节点*i*),用户将在 EVSE上设置预计离开的时间及期望的荷电状态 *S*_{tar},EV电池的初始荷电状态*S*₀,实时荷电状态*S*_n,将 由电池管理系统(BMS)传送至 EVSE。将t时刻 EVSE 与 EV_n间的充放电功率记为 $x_{n,t}$,可用式(1)表示。

$$x_{n,t} = f(\alpha_{n,t}, \beta_{n,t}, \gamma_{n,t})$$
(1)

式(1)表示 $x_{n,t}$ 的具体大小由模糊逻辑控制器 $f(\cdot)运算输出, \alpha_{n,t}, \beta_{n,t}, \gamma_{n,t}$ 为影响控制器输出的因 素,在本文中分别对应电压偏差 $\Delta v_{n,t}$,用车紧急度 $\lambda_{n,t}^{ct}$ 和实时电价 $p_{t,c}$

用 $J_{N_{EV}}$ 表示配电网中 N_{EV} 辆EV的集合,以 $G_i = \{n: i \in J_{N_{EV}}\}$ 表示从配电网节点i接入充放电的EV集合,以 $P_{i,t}^{hae}$ 表示t时刻节点i的基本负荷(不含EV),则t时刻节点i的EV充放电功率 $P_{i,t}^{EV}$ 和总负荷 $P_{i,t}$ 分別如式(2)和式(3)所示。

$$P_{i,t}^{\text{EV}} = \sum_{n \in G_i} x_{n,t} \quad \forall i \in N, \forall t \in H$$
(2)

$$P_{i,t} = P_{i,t}^{\text{base}} + P_{i,t}^{\text{EV}} \quad \forall i \in N, \, \forall t \in H$$
(3)

当前时刻配电网内所有 EV 的总充电功率 P_i^{EV} 如式(4)所示。

$$P_{t}^{\text{EV}} = \sum_{i=1}^{t} P_{i,t}^{\text{EV}} \quad \forall t \in H$$

$$\tag{4}$$

式(2)—(4)用于配电网时序潮流计算。

1.1 用车紧急度模型

1.1.1 剩余驻留时间

t时刻EV_n在当前活动目的地的剩余驻留时间 $\Delta T_{n,t}$ 由式(5)确定。

$$\Delta T_{n,t} = t_n^{\rm dep} - t \tag{5}$$

其中,t为当前时刻;t^{hep}为EV,的离开时间,由用户根据其自身需求设定。一般而言,剩余驻留时间越长,则用车紧急度越低。

1.1.2 剩余驻留时间内能补充的最大电能

在当前t时刻, EV_a在剩余驻留时间内若以 EVSE的最大输出功率水平充电,还能补充的最大电 能记为 E_{nt}^{max} (单位为 $kW\cdot h$),如式(6)所示。

$$E_{n,t}^{\max} = \eta P^{\text{rated}} \Delta T_{n,t} \tag{6}$$

其中,Prated 为最大充电功率,单位为kW。

1.1.3 当前时刻还需补充的电能

EV 从抵达到离开期间,前后时间间隔所需补充 的电量关系可用式(7)表示。

$$\Delta E_{n,t}^{\text{req}} = \Delta E_{n,t-\Delta t}^{\text{req}} - x_{n,t-\Delta t} \Delta t \tag{7}$$

其中, $\Delta E_{n,t}^{\text{req}} \Delta E_{n,t-\Delta}^{\text{req}}$ 分别为当前时刻、上一时刻 EV_n 还需补充的电能,单位为kW·h; $x_{n,t-\Delta}$ 为上一时刻模 糊逻辑控制决策的 EV_n充放电功率,单位为kW; Δt 为时间间隔,单位为h。需先计算 EV_n抵达时刻初始 所需补充电能 $\Delta E_{n,t}^{\text{req}}$,如式(8)所示。

$$\Delta E_{n,t^{\text{arr}}}^{\text{req}} = (S_{n,t^{\text{dep}}} - S_{n,t^{\text{arr}}})E_n \tag{8}$$

其中, t_n^{arr} 为 EV_n的抵达时刻; $S_{n,t_n^{arr}}$ 、 $S_{n,t_n^{dep}}$ 分别为 EV_n抵达、离开对应时刻的荷电状态, $S_{n,t_n^{arr}}$ 即为初始荷电状

态 S_0 , $S_{n,l_n^{dep}}$ 即为用户设定的期望荷电状态 S_{tar} ; E_n 为 EV_n的电池容量,单位为kW·h。

1.1.4 用车紧急度

本文定义 EV_a在当前 t时刻的用车紧急度 $\lambda_{n,t}^{eu}$ 如 式(9)所示,其值为 EV_a在剩余驻留时间内还需要补 充的电能 $\Delta E_{n,t}^{req}$ 与最大可补充的电能 $E_{n,t}^{max}$ 之比。通常 而言,充电紧急度的值越大,则 EV 充电功率应该越 高;而当充电紧急度的值较小时,可考虑参与放电。

$$\lambda_{n,t}^{\rm cu} = \Delta E_{n,t}^{\rm req} / E_{n,t}^{\rm max} \tag{9}$$

1.2 节点电压偏差量

配电网特别是辐射状配电网的负荷与电压关系 密切,一般负荷越高,则电压水平越低;相反地,负荷 较低,则电压水平越高。节点电压水平反映配电网 的运行情况,节点电压偏差量Δv_i,根据式(10)计算。

$$\Delta v_{i,t} = v_{i,t} - v_i^{\text{ref}} \tag{10}$$

参考电压*v*_i^{ref}可根据实际运行要求设置,也可根据式(11)确定。

$$v_i^{\text{ref}} = \max\left\{\frac{1}{D}\sum_{d=1}^{D}\min\left\{v_d\right\}, v^{\min} + \Delta v\right\}$$
(11)

其中,D为天数,如取一个自然季度,具体可根据当地区域控制需要选取;min { v_d }为节点*i*在第*d*天的 实测电压最小值; v^{\min} 为电压运行要求的最低值; Δv 为加入的安全边界控制值。另外,一般低压配电网 的电压运行水平需满足一定的要求,本文参考文献 [22],取电压运行范围为 0.95~1.05 p.u.。因此,式 (11)中以 v^{\min} + Δv 维持电压运行水平。

另外,在辐射状配电系统中,当负荷较轻时,电 压偏差为正值;而当电压偏差为负值时,负荷往往较 重。因此,针对该输入量,当电压偏差为正时,模糊 逻辑控制器给予EVSE充电信号;反之,当电压偏差 为负值时,模糊逻辑控制器给出放电信号。但需要 说明的是,具体的模糊逻辑控制器的充放电功率输 出值还受EV后续驻留时段能补充的电能约束。

1.3 实时电价分析

本文主要考虑实时电价政策下 EV 的充放电功 率控制策略,目前我国电力市场还处在不断改革与 发展中,未来可能实施实时电价政策,但现在还没有 相应的运行数据。因此,本文采用美国宾夕法尼亚 州一新泽西一马里兰互联独立系统运行商(即 PJM ISO)的数据进行分析。附录中图 A1 为 PJM ISO 管 辖区域 PSE&G 的 2018年2月1日至 2019年1月31日 的实时电价曲线。

从附录中图A1可看出,实时电价具有波动性, 反映各时刻供应与需求的变化关系,在一些时刻出 现了较大的极值。需注意的是,图A1中还存在负电 价,这是因为系统的可用发电量远高于当时的负荷 需求,发电方考虑运行成本,为了保持机组运转而不 得不付钱给用户来促使其用电。对于EV用户而言, 在保障其用车需求的前提下,采取在低电价时段补充 电能,在高电价时段不充电或放电决策是较为有利 的,而在负电价情况下EV以最大充电功率补充电能 可减少成本(甚至获得利润)。求取图A1所示实时电 价的均值、标准差分别为30.07、19.57 \$/(MW·h)。 另外,按5 \$/(MW·h)为区间对图A1所示电价进行 统计,得到概率分布如附录中图A2所示。

从附录中图 A2 可看出,一年中 80% 的电价低于 35 \$ / (MW·h),且实时电价并不是服从正态分布, 实际情况是:低于 15 \$ / (MW·h)的电价情况较少, 高于 45 \$ / (MW·h)的电价情况也较少。

1.4 实时充放电功率约束

EV 充放电功率的实时控制本质上是结合当前 时刻情况给出该时刻充电 / 放电状态及其大小的决 策 $x_{n,t}$,其值受到后续驻留时间内可补充最大电能的 约束。决策时刻示意图见图 2。图中, ΔE_n^{req} 为当前 时刻 EV 还需补充的电量,单位为 kW·h; ΔE_n^{next} 为下 一时刻至离开时刻能够补充的最大电量,单位为 kW·h,如式(12)所示。





图 2 中的决策时刻为当前时刻 t_n ,决策范围如图 中阴影部分所示,实时充放电决策就是在当前时刻 t_n 确定 $t_n - t_n + \Delta t$ 时段是采取充电还是放电的决策, 以及具体的充电功率或放电功率大小(也可能是0 值,即表示既不充电也不放电)。充放电决策受到后 续驻留时间内可补充电能的约束,具体分为以下2 种情形。

(1)情形 1: $\Delta E_n^{req} \ge \Delta E_n^{net}$ 。该情形说明在 $t_n - t_n + \Delta t$ 时段需采取充电决策,否则在后续时段将难 以满足用户的用车需求,且充电功率大小需要满足 式(13),并记满足式(13)的 $x_{n,t}$ 的最低充电功 率为 $x_{n,t}^{ch,min}$ 。

 $\Delta E_n^{\text{req}} - \Delta E_n^{\text{next}} \leq x_{n,t} \Delta t \leq P_{\text{ch}}^{\text{max}} \Delta t \qquad (13)$ 其中, $P_{\text{ch}}^{\text{max}}$ 为 EV 的最高充电功率限制, 满足 $P_{\text{ch}}^{\text{max}}$ = min{ $\Delta E_n^{\text{req}} / \Delta t$, P^{rated} }

(2)情形 2: $\Delta E_n^{\text{req}} < \Delta E_n^{\text{next}}$ 。该情形说明 EV 在剩 余驻留时间内电量的补充有一定的裕度, 在 $t_n - t_n + \Delta t$ 时段不充电、充电、放电在客观上均可行, 但放电 功率应满足式(14), 记最大放电功率为 $x_{n,t}^{\text{dis}, \max}$ 。

$$0 \le x_{n,t} \Delta t \le \Delta E_n^{\text{next}} - \Delta E_n^{\text{req}}$$
(14)

2 考虑用车紧急度的EV充放电功率模糊逻 辑控制器设计及仿真流程

模糊逻辑控制器通常包括模糊化、规则库、模糊 推理机制、解模糊4个模块,如图3所示。本文所提模 糊逻辑控制方案兼顾电网、用户利益,由3个输入量 (节点电压偏差量 $\Delta v_{n,t}$,用车紧急度 $\lambda_{n,t}^{cc}$,实时电价 p_t)、 1个输出($t_n - t_n + \Delta t$ 时段EV充放电功率 $x_{n,t}$)组成。



图 3 模糊逻辑控制器的组成模块

Fig.3 Component module of fuzzy logical controller

2.1 变量模糊化

2.1.1 输入、输出量的模糊化

本文将模糊逻辑控制器的输入、输出变量均描述为5种语言的相应模糊信号,具体如附录中表A1 所示。对于节点电压偏差量,NS、ZE、PS分别表示配 电网运行在较差、正常、良好水平状态;类似地,NB、 PB分别表示电压偏低(低于0.95 p.u.)、过电压(高于 1.05 p.u.)2种极端情况。对于用车紧急度而言,EL 表示 EV 充电需求不急或者其需要的能量不多,而 EH表示高能量需求,前者有能力在电网电压运行水 平较低、电价较高时参与放电,后者将因其自身用车 需求的紧急度很高而对电价高低相对不敏感。对于 实时电价而言,N表示电价较低,PS、PB分别表示相 对正常水平M稍高、较高的情况,PBB则表示电价非 常高。对于控制器的输出量充放电功率而言,HD、 LD、ZE、LC、HC分别表示高放电功率、低放电功率、 功率为0、低充电功率、高充电功率。

2.1.2 基于中位数-平均绝对离差的电价模糊化

一般而言,实时电价能反映实际供需情况,由附录中图 A2 可知,每个区间的频数存在较大的差异, 对电价输入量进行模糊化不适合采用均值划分。本 文设计了一种基于中位数–平均绝对离差的模糊化 处理方法,首先选取实施区域的历史实时电价,离线 计算历史实时电价的中位数 φ_{price} 和平均绝对离差 σ_{ories} ,如式(15)所示。

$$\begin{cases} \varphi_{\text{price}} = g(\operatorname{ceil}(N_{\text{price}}/2), \operatorname{sort}(p_t^{\text{his}})) \\ \sigma_{\text{price}} = \frac{1}{N_{\text{price}}} \sum_{t=1}^{N_{\text{price}}} |p_t^{\text{his}} - \overline{p}_t^{\text{his}}| \end{cases}$$
(15)

其中, ceil(·)为向上取整函数; sort(·)为将实时电价 按从小到大升序排序的函数; $g(\cdot)$ 表示在排序后的 实时电价序列里选取对应的电价值; p_{ι}^{his} 、 \bar{p}_{ι}^{his} 分别为 历史实时电价和对应的历史电价平均值; N_{price} 为电 价样本数,如选取实施区域某一年、某一自然季度或 某一月的实时电价。

根据式(15)计算附录中图 A1 和图 A2 所示实时 电价的中位数和平均绝对离差值分别为 φ_{price} =25.90 \$/(MW·h)、 σ_{price} =15.60 \$/(MW·h)。然后按照表1 选取实时电价的模糊量峰值。

表1 实时电价的模糊化

Table 1	Fuzzification	of	real-time	electricity	price
				2	

序号	电价	模糊量峰值 / [\$•(MW•h)⁻¹]	模糊语言
1	$arphi_{ m price}$ – $\sigma_{ m price}$	15.6	Ν
2	$arphi_{ m price}$	25.9	Μ
3	$arphi_{ m price}$ + $\sigma_{ m price}$	36.2	PS
4	$arphi_{ m price}$ + 2 $\sigma_{ m price}$	46.5	PB
5	$\varphi_{\rm price}$ + $3\sigma_{\rm price}$	56.8	PBB

2.1.3 输入、输出量隶属度函数

控制器除输入量电压偏差 Δv 的NB、PB,用车紧 急度 λ^{cu} 的EL、EH,实时电价 p_i 的N、PBB以及输出量 充放电功率 $x_{n,i}$ 的HD、HC,采用梯形隶属度函数描述外,其他均采用三角形隶属度函数描述,它们的数 学表达式分别如式(16)—(18)所示。附录中图A3 给出了输入、输出量的隶属度函数曲线。

$$\mu(y) = \begin{cases} 1 & y \leq a \\ \frac{b-y}{b-a} & a < y < b \\ 0 & y \geq b \end{cases}$$
(16)
$$\mu(y) = \begin{cases} 0 & y \leq c \\ \frac{y-c}{d'-c} & c < y < d' \\ 1 & y \geq d' \end{cases}$$
(17)
$$\mu(y) = \begin{cases} 0 & y < e, y > g \\ \frac{y-e}{f-e} & e \leq y \leq f \\ \frac{g-y}{g-f} & f < y \leq g \end{cases}$$
(18)

其中,式(16)为降半梯形分布,*a*、b分别为梯形右侧 边的上顶点、下基点,*y*为变量;式(17)为升半梯形分 布,*c*、d'分别为梯形左侧边的下基点、上顶点;式 (18)为三角形隶属度函数,*f*为三角形的顶点,*e*、g 分别为三角形底边左、右基点。

2.2 模糊机制

本文基于电压运行水平,考虑用车紧急度和车 主利益,设计了三输入单输出的模糊系统,其核心思 想如下。

(1)在电压偏差量为正值的情形下,当用车紧急 度不高时,EV在低电价时段不放电,在高电价时段 不充电;当用车紧急度较高时,EV在低电价时段充 电,在高电价时段不放电。

(2)在电压偏差量为负值的情形下,当用车紧急 度不高时,EV在低电价时段不充电,在高电价时段 放电;当用车紧急度较高时,EV在低电价时段不放 电,在高电价时段不充电。

采用的模糊控制规则表达为"if $\Delta v_{n,t}$ is … and $\lambda_{n,t}^{eu}$ is … and p_t is … then $x_{n,t}$ is …",规则 数 Z=125,建立的模糊规则库见附录中表 A2。实际 应用时该规则库可由电网公司和车主协商制定。

采用面积重心法进行去模糊化,设第*j*条模糊规则输出为μ_i,则输出表达式如式(19)所示。

$$x_{n,t} = \frac{\sum_{j=1}^{Z} v_{j} \mu_{j}}{\sum_{j=1}^{Z} v_{j}}$$
(19)

其中,*v*_j为控制器中第*j*条模糊规则在总输出中所占 权重,计算式如式(20)所示。

$$\boldsymbol{v}_i = A^j(\boldsymbol{y}) \tag{20}$$

其中,Aⁱ(y)为控制器中输入量第*j*条模糊规则所对 应模糊子集的隶属度。

2.3 仿真流程

根据前文所述内容,本文在MATLAB R2018b 环境下进行仿真,采用前推后代法进行潮流计算,通 过调用MATLAB/Simulink模糊控制工具箱及对应 模块进行模糊逻辑控制计算,仿真流程具体如下。

(1)输入系统参数,包括配电网参数、各节点基本负荷参数、负荷一天的变化系数、EV及EVSE参数等。

(2)当前时刻调用潮流计算程序,获得该时刻的 潮流分布,并计算相应的运行指标,包括配电网高峰 负荷、低谷负荷、网络损耗、电压偏差等。

a. 计算一天内不含 EV 时的配电网潮流及运行 指标,并将各节点在一天中的最低电压与 $v^{\min} + \Delta v$ 进行比较,取其中值相对较大者为各节点的参考电 压值;

b. 随机抽取 EV 抵达情况,进行 M 次蒙特卡洛 仿真得其无序充电(抵达后立即充电,称为 IC(Immediate Charging)策略)负荷,并存储其中最大充电 负荷情形下的 EV 状况;

c. 将最大充电负荷叠加至不含 EV 时的基本负荷,然后计算无序充电时的配电网潮流和运行指标,并计算各节点的电压偏差。

(3)基于最大充电负荷情形下的EV状况,按照 1.1节中的充电紧急度模型求取各EV在当前时刻的 充电紧急度。

(4)按照1.4节求取对应时刻的充放电功率约 束值。 (5)读取当前时刻的实时电价。

(6)调用模糊逻辑控制算法,获得当前时刻模糊 逻辑控制的充放电功率。

(7)比较步骤(4)和步骤(6)中的功率值,得到 EVSE的充放电决策,将其功率值叠加至基本负荷, 并进行潮流计算获得运行指标。

(8)重复步骤(2)—(7),获得一天内每个时刻的结果。

3 仿真算例

3.1 系统参数设置

采用附录中图A4所示的修改后IEEE 33节点系 统代表住宅区低压配电网,该网络中共有33个节 点,包括1个平衡节点(编号为0)和32个节点(编号 为1—32),假设该住宅区的负荷高峰值1296 kW, 由2台800 kV·A的配电变压器供电,变压器运行效 率设为95%。

(1)基本负荷、EV及EVSE参数。

在算例中,每个节点的基本负荷和安装有含模 糊逻辑控制器的低压EVSE的数量如附录中表A3所 示,本文假设一辆EV配备一台EVSE,如此EV总数 为238辆。EV的到达时间、离开时间、到达时的电 池荷电状态S₀分别采用文献[23]中的高斯分布函数 N(19,2²)、N(7,2²)、N(0.75,0.25²)建模,电池容量设 为24 kW·h,车辆离开时的预期荷电状态水平设置 为24 kW·h,车辆离开时的预期荷电状态水平设置 为0.9。EVSE的最大充放电功率为3.5 kW。因EV 充电负荷具有随机性,本文采用蒙特卡洛仿真方法 获得无序充电负荷分布情况,仿真次数取500次,其 结果如附录中图A5所示,并选取其中总充电负荷最 大值时所对应的EV抵达时间、离开时间以及初始荷 电状态值作为算例分析的基本参数。

(2)负荷变化系数及电价参数。

算例选取 PSE&G 某计量节点 2019年2月4日至 2月5日一天的负荷变化曲线作为附录中图 A4 所示 配电网节点的实时负荷变化系数,电价参数采用对 应的当天实时电价,如图4所示。







算例中节点0的电压设为1 p.u.,不含 EV 充电时配电网的潮流计算结果如附录中图 A6 所示,选取

每个节点在一天中的最低电压值为参考电压,并以 式(11)中 v_{min} + Δv 的电压最低限制进行约束(对应 取值为0.95 p.u.+0.01 p.u.)。

3.2 算例分析

本节从负荷曲线、电压曲线以及控制过程和性能指标几个方面分析模糊逻辑控制器的效果。其中除了与无序充电策略进行比较外,本文还采用文献 [24]中的平均充电功率控制策略(将充电需求平均 至 EV 驻留期间每个时间间隔的方案,记为 ACR)及随机控制策略(在 EV 驻留期间,每个间隔产生一个 0 至最大充电功率值之间的随机功率进行充电,记 为 RDC)对算例进行控制,并与本文所提控制策略进 行对比,评价的指标包括一天中住宅区的高峰负荷、 低谷负荷、网络损耗、总电压偏移量、用户费用等。 3.2.1 负荷控制结果

图 5 为充电负荷曲线和不同控制策略下的总负 荷曲线。由图 5 可看出,在无序充电策略下,负荷集 中于 EV 抵达住宅区的时段,造成了"峰上加峰"的负 面影响;在平均充电功率控制策略下,充电负荷被均 匀分配至 EV 驻留的各个时段,削减了配电网的负荷 高峰;当采用随机控制策略时,在保证用户行驶需求 的前提下,对充电起始时间进行了随机延迟,同样起 到了降低高峰负荷的效果;当采用本文所提模糊逻 辑控制策略时,EV 在负荷高峰、电价较高时段参与 放电,而在负荷较低、电价较低时段进行充电,有效 起到了削峰填谷的作用。



图5 不同控制策略下的负荷曲线

Fig.5 Load curves under different control strategies

3.2.2 电压控制结果

由附录中图A6可知,当不含EV充电负荷时,各 个节点均运行于最低限制电压以上,而当EV接入无 序充电时,各节点的电压曲线如附录中图A7所示。 由图可看出,部分节点在负荷较高的时段出现了电 压越限情况,特别是下游节点。而在初始潮流计算 中,节点17的电压幅值最小,以该节点为研究对象 具有代表性。因此,本文选取上游节点5和末端节 点17分析不同控制策略下的运行结果,如图6所示 (图中电压为标幺值)。由图6可知,上游节点5的电 压均运行于限制范围之内,而无序充电控制策略下 的负荷造成节点17电压有较大幅度的跌落,采取平 均充电功率控制策略和随机控制策略时电压运行水 平均有所提高,但仍有越限情况;而当采用模糊逻辑 控制策略时,由于部分EV在负荷高峰时段参与放 电,使节点电压得到有效提升,且一天中所有时刻的 电压均在限制范围之内。模糊逻辑控制策略下各节 点电压曲线见附录中图A8。



图6 不同控制策略下节点5和节点17的电压曲线

Fig.6 Voltage curves of Node 5 and Node 17 under different control strategies

3.2.3 EV充放电控制过程

为了观察模糊逻辑控制策略的控制情况,选取 节点32的4辆EV(EV₁—EV₄)进行分析,表2为对应 车辆的抵达时刻、离开时刻以及初始荷电状态。

表2 节点32的EV信息

Table 2 Ele	ectric vehicles	' information	of Node	32
-------------	-----------------	---------------	---------	----

车辆	抵达时刻	离开时刻	初始荷电状态
EV_1	20:00	06:00	0.5376
EV_2	20:00	08:00	0.8500
EV_3	19:00	08:00	0.6617
EV_4	23:00	12:00	0.5811

EV的充放电功率控制结果见附录中图 A9。由 图可知, EV₁—EV₃的抵达时间是电网的负荷高峰时 段,此时电价也处于很高的状态,所以 EV₁—EV₃均 参与了放电,且相较于 EV₁, EV₂的荷电状态水平较 高,驻留时间长,用车紧急度低,故 EV₂在该时段的 放电功率比 EV₁高;之后在相对低电价的时段补充 电能,但 EV₁和 EV₂在 07:00时刻的充电功率比之前 时刻的充电功率大,这是因为它们将在 08:00时刻离 开。EV₄的抵达时间较晚,在 23:00时刻参与了放 电,在 07:00时刻(电价较高时段)的充电功率为0, 在 12:00时刻(出发前)完成充电。附录中图 A9(b) 为各辆 EV 在各个时刻还需补充的荷电状态(即还需 补充的电能),由图可知所有EV在离开前均满足了 充电需求,达到充电预期。

3.2.4 性能指标对比

表3给出了不同控制策略下配电网一天的高峰 负荷、低谷负荷、网络损耗、总节点电压偏差量以及 用户费用等指标的仿真结果。

表3 不同控制策略下的性能指标对比

Table 3 Comparison of performance indices among different control strategies

			8		
策略	高峰负 荷 / kW	低谷负 荷 / kW	网络 损耗 / kW	电压 偏差量	用户 费用 / \$
不含EV	1 296.0	893.4	679.7	19.67	_
无序充电	1627.7	900.3	743.4	20.54	47.9
平均充电功率控制	1381.7	980.7	737.2	20.50	39.4
随机充电控制	1434.9	943.7	742.3	20.53	44.6
模糊逻辑控制	1268.5	1002.4	720.0	20.32	5.1

由表3可看出,EV无序充电给配电网运行增加 了负荷高峰,且导致了变压器过载、峰谷差加大、网 络损耗增大、电压偏差量增高等问题;平均充电功率 和随机充电控制策略下,高峰负荷、峰谷差、网络损 耗、电压偏差量等运行指标得到了一定程度的改善; 采用本文所提模糊逻辑控制策略后,各个运行指标 得到更有效的提升;在经济性方面,模糊逻辑控制策 略下 EV 参与放电,使用户费用降低。

4 结论

EV 实时充放电控制是当前的研究热点,本文构 建了 EV 充放电功率控制框架,对旨在降低电网高峰 负荷、峰谷差、网络损耗,同时满足车主行驶需求并 降低其充电成本的 EV 充放电控制策略展开研究,通 过算例对所提策略进行了验证,仿真结果表明:

(1)本文设计的EV充放电率模糊逻辑控制器, 能根据用车紧急度、节点电压偏差量和实时电价输 出实时充放功率,并兼顾电网侧和用户侧的需求;

(2)本文以EV用户用车紧急度作为充放电功率 实时控制的影响因素,更能反映实际情况,相较于已 有方法将当前时刻的电池荷电状态或驻留时间作为 充放电约束条件更为合理;

(3)本文所提的基于中位数-平均绝对离差的实时电价模糊化处理方法,使得控制器对实时电价能进行合理反馈,做出相应的实时控制决策。

在模糊逻辑控制器设计过程中,在隶属度函数的选取、模糊规则的确定方面存在一定的主观性。因此,笔者下一步的研究将着力于修正模糊推理规则的学习方式、参数的调整方法,研究其自动优化生成方法。另外,EV车主不会主动配合电网公司的控制,电网公司需以一定的补偿激励EV用户参与维持配电网运行水平,后续将深入研究电力市场背景下的补偿机制及车、网多主体的互动模式。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1] CLAIRAND J M, RODRIGUEZ-GARCIA J, ALVAREZ-BEL C. Smart charging for electric vehicle aggregators considering users' preferences[J]. IEEE Access, 2018, 6:54624-54635.
- [2] 王建,吴奎华,刘志珍,等. 电动汽车充电对配电网负荷的影响 及有序控制研究[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):47-52.
 WANG Jian, WU Kuihua, LIU Zhizhen, et al. Impact of electric vehicle charging on distribution network load and coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2013, 33(8):47-52.
- [3] 陈丽丹,张尧,Antonio Figueiredo. 融合多源信息的电动汽车 充电负荷预测及其对配电网的影响[J]. 电力自动化设备, 2018,38(12):1-10. CHEN Lidan,ZHANG Yao,ANTONIO Figueiredo. Charging

 load forecasting of electric vehicles based on multi-source information fusion and its influence on distribution network[J].
 Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(12):1-10.

- [4]武小梅,谢旭泉,林翔,等.电动汽车提供备用服务的地区电力 市场模型[J].电力系统自动化,2016,40(24):71-76.
 WU Xiaomei,XIE Xuquan,LIN Xiang, et al. Local electricity market model considering reserve service provided by electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40 (24):71-76.
- [5] MUKHERJEE J C, GUPTA A. A review of charge scheduling of electric vehicles in smart grid[J]. IEEE Systems Journal, 2015,9(4):1541-1553.
- [6] TANG W R,BI S Z,ZHANG Y J. Online charging scheduling algorithms of electric vehicles in smart grid: an overview[J]. IEEE Communications Magazine,2016,54(12):76-83.
- [7] 刘其辉,张怡冰,卫婧菲,等. 电动汽车充电区/站两级实时能 量管理机制及优化策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(6): 122-129,152.
 LIU Qihui,ZHANG Yibing,WEI Jingfei, et al. Two-stage realtime energy management mechanism and optimization strategy for EV charging area / station[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(6):122-129,152.
- [8] 程亦直,张沛超. 配电网中电动汽车的实时滚动交易式充电管理[J]. 中国电机工程学报,2019,39(19):5703-5713,5898.
 CHENG Yizhi, ZHANG Peichao. Real-time rolling transactive charging management of electric vehicles in distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(19):5703-5713, 5898.
- [9] 李正烁,郭庆来,孙宏斌,等. 计及电动汽车充电预测的实时充 电优化方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):61-68.
 LI Zhengshuo,GUO Qinglai,SUN Hongbin, et al. Real-time charging optimization method considering vehicle charging prediction[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9): 61-68.
- [10] 谭小波,赵海,彭海霞,等.电动汽车准实时协同充放电策略
 [J].电工技术学报,2015,30(13):69-76.
 TAN Xiaobo,ZHAO Hai,PENG Haixia, et al. Quasi-real-time coordinated charging/discharging policy for electric vehicles
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (13):69-76.
- [11] 李佩杰,林颂晨,白晓清,等. 计及配电网三相模型的电动汽车 充电滚动时域控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17): 4533-4542.

LI Peijie, LIN Songchen, BAI Xiaoqing, et al. Receding-horizon-control-based charging method of electric vehicle considering three-phase model of distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17):4533-4542.

- [12] ZHENG Y,SONG Y,HILL D J,et al. Online distributed MPCbased optimal scheduling for EV charging stations in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019,15(2):638-649.
- [13] 胡俊杰,周华嫣然,李阳.集群电动汽车平抑光伏波动实时调度策略[J].电网技术,2019,43(7):2552-2560.
 HU Junjie, ZHOU Huayanran, LI Yang. Real-time dispatching strategy for aggregated electric vehicles to smooth power fluctuation of photovoltaics[J]. Power System Technology,2019,43 (7):2552-2560.
- [14] SHAABAN M F, ISMAIL M, EL-SAADANY E F, et al. Realtime PEV charging / discharging coordination in smart distribution systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (4):1797-1807.
- [15] 张怡冰,刘其辉,洪晨威,等. 基于模糊控制的区域电动汽车 入网充放电调度策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(7): 147-153.
 ZHANG Yibing,LIU Qihui,HONG Chenwei,et al. Charging and discharging dispatch strategy of regional V2G based on fuzzy control[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(7): 147-153.
- [16] SINGH M, KUMAR P, KAR I. Implementation of vehicle to grid infrastructure using fuzzy logic controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):565-577.
- [17] SINGH M,THIRUGNANAM K,KUMAR P,et al. Real-time coordination of electric vehicles to support the grid at the distribution substation level[J]. IEEE Systems Journal, 2015,9 (3):1000-1010.
- [18] MA T, MOHAMMED O A. Optimal charging of plug-in electric vehicles for a car-park infrastructure [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4):2323-2330.
- [19] AL-AWAMI A T,SORTOMME E,AKHTAR G,et al. A voltagebased controller for an electric vehicle charger[J]. IEEE Tran-

sactions on Vehicular Technology, 2015, 65(6): 4185-4196.

- [20] FADDEL S,MOHAMED A A S,MOHAMMED O A. Fuzzy logicbased autonomous controller for electric vehicles charging under different conditions in residential distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 148:48-58.
- [21] 苏粟,刘紫琦,王世丹,等.基于用户驾驶行为特性的电动汽车 有序充电策略[J].电力自动化设备,2018,38(3):63-71.
 SU Su,LIU Ziqi,WANG Shidan, et al. Ordered charging strategy of electric vehicles based on users' driving behavior[J].
 Electric Power Automation Equipment,2018,38(3):63-71.
- [22] National Electrical Manufacturers Association J Rosslyn, American National Standards Institute (ANSI). Voltage ratings for electric power systems and equipment; C84.1-2006[S]. [S.1.]; ANSI,2006.
- [23] VAGROPOULOS S, BAKIRTZIS A. Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4):4031-4041.
- [24] MOULI G R C, KEFAYATI M, BALDICK R, et al. Integrated PV charging of EV fleet based on energy prices, V2G and offer of reserves[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1313-1325.

作者简介:



陈丽丹(1981—),女,浙江浦江人,副 教授,博士,主要研究方向为电动汽车与电 网互动、新能源技术、电力系统优化规划与 运行等(E-mail:chenld@gcu.edu.cn);

欧阳慧林(1979—),女,湖南双峰人, 高级工程师,硕士,从事电网规划、系统接 入方面的工程研究和应用工作(E-mail: dg29053@126.com)。

(编辑 陆丹)

Fuzzy logical control strategy of EV charging / discharging considering perceived urgency

CHEN Lidan¹, OUYANG Huilin²

(1. School of Electrical Engineering, Guangzhou College of South China University of Technology, Guangzhou 510800, China;2. Dongguan Electric Power Design Institute, Dongguan 523413, China)

Abstract: Aiming at the real-time charging / discharging control problem of EVs (Electric Vehicles), a realtime control method for charging / discharging power of distributed EVs based on fuzzy logical control is proposed. The perceived urgency model is established based on the relationship between the needed energy of EVs at the current time and the maximum available charging energy during the remaining parking time. The node voltage deviation at current time is obtained according to the preset reference voltage of the node and the actual measured voltage. The fuzzy logical controller of EVs' real-time charging / discharging power is designed by considering the perceived urgency, the node voltage deviation and the real-time electricity price, and a fuzzification method of real-time electricity price based on median-average absolute dispersion is proposed. Compared with the disordered charging control strategy, the average charging power control strategy and the random control strategy, simulation analysis is carried out to verify that the proposed method can ensure the node voltage within the control level range, realize peak load shifting effectively and reduce network loss and user cost.

Key words: electric vehicles; perceived urgency; fuzzy logical control; charging / discharging power; real-time electricity price



¹数据来源:<u>https://www.engieresources.com/historical-data#reports_anchor</u>





Fig.A3 Membership functions of input and output variables



图 A4 修改的 IEEE 33 节点配电系统拓扑

Fig.A4 Topology of modified IEEE 33-bus distribution system



图 A5 基于蒙特卡洛仿真的电动汽车无序充电负荷曲线 Fig.A5 Load curve with electric vehicles dumb charging based on Monte Carol simulation



图 A6 不含电动汽车时各节点电压曲线 Fig.A6 Node voltage curves without EVs



图 A7 电动汽车无序充电时各节点电压曲线 Fig.A7 Node voltage curves with EVs dumb charging





Fig.A8 Node voltage curves under fuzzy logic control strategy



(a)电动汽车充/放电功率



(b) 还需补充的 SOC (deltaSOC) 图 A9 模糊逻辑控制策略下节点 32 电动汽车的充放电功率 Fig.A9 Charging/discharging power of EVs at Node 32 under fuzzy logic control strategy

表 A1	输入、	输出量的植	莫糊化语言	
Table A1 Lir	guistic	variables for	r input and	output

$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$		$\Delta v_{n,t}$		p_t	-	$X_{n,t}$	
超低, Extra Low	EL	负大, Negative Big	NB	低, Negative	Ν	低充电功率, Low Charge	LC
低, Low	L	负小, Negative Small	NS	中, Medium	М	高充电功率,High Charge	HC
中, Medium	М	正常,Zero	ZE	较高, Positive Small	PS	不充不放,Zero	ZE
高, High	Н	正小, Positive Small	PS	很高, Positive Big	PB	低放电功率, Low Discharge	LD
超高,Extra High	EH	正大, Positive Big	PB	非常高, Positive Big Big	PBB	高放电功率,High Discharge	HD

表 A2 模糊逻辑控制规则表 Table A2 FLC rule base

			10	1010 112	I LO II				
序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$x_{n,t}$	序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$X_{n,t}$
1			Ν	ZE	26			Ν	ZE
2			М	LD	27			М	ZE
3		EL	PS	LD	28		EL	PS	LD
4			PB	HD	29			PB	LD
5			PBB	HD	30			PBB	HD
6			Ν	ZE	31			Ν	ZE
7			М	LD	32			М	ZE
8		L	PS	LD	33		L	PS	LD
9	ND		PB	LD	34	NC		PB	LD
10	NB		PBB	HD	35	IND		PBB	LD
11			Ν	ZE	36			Ν	ZE
12			Μ	ZE	37			М	ZE
13		Μ	PS	LD	38		Μ	PS	ZE
14			PB	LD	39			PB	LD
15			PBB	LD	40			PBB	LD
16			Ν	LC	41			N	HC
17		Н	Μ	LC	42		Н	Μ	LC
18			PS	LC	43			PS	LC

19			PB	LC	44			PB	LC
20			PBB	ZE	45			PBB	ZE
21			Ν	LC	46			Ν	HC
22			М	LC	47			М	HC
23		EH	PS	LC	48		EH	PS	LC
24			PB	LC	49			PB	LC
25			PBB	ZE	50			PBB	ZE
序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$x_{n,t}$	序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$X_{n,t}$
51			Ν	ZE	76			Ν	ZE
52			М	ZE	77			М	ZE
53		EL	PS	LD	78		EL	PS	ZE
54			PB	LD	79			PB	LD
55			PBB	LD	80			PBB	LD
56			Ν	ZE	81			Ν	ZE
57			М	ZE	82			М	ZE
58		L	PS	ZE	83		L	PS	ZE
59			PB	LD	84			PB	ZE
60			PBB	LD	85			PBB	LD
61		-	Ν	LC	86			Ν	LC
62			М	LC	87			М	LC
63	ZE	М	PS	ZE	88	PS	М	PS	ZE
64			PB	ZE	89			PB	ZE
65			PBB	ZE	90			PBB	ZE
66			Ν	HC	91			Ν	HC
67			М	LC	92			М	LC
68		Н	PS	LĊ	93		Н	PS	LC
69			PB	LĊ	94			PB	LC
70			PBB	LC	95			PBB	LC
71			N	HC	96			N	HC
72			M	LC	97			M	HC
73		EH	PS	LC	98		EH	PS	LC
74		211	PB	LC	99		211	PB	LC
75			PBB	ZE	100			PBB	ZE
序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$x_{n,t}$	序号	$\Delta v_{n,t}$	$\lambda_{n,t}^{\mathrm{cu}}$	p_t	$x_{n,t}$
101			Ν	ZE	116			Ν	HC
102			М	ZE	117		т	М	HC
103		EL	PS	ZE	118		Н	PS	LC
104			PB	ZE	119			PB	LC
105			PBB	LD	120	DD		PBB	ZE
106			N	ZE	121	PB		Ν	HC
107			М	ZE	122			М	HC
108	PB	L	PS	ZE	123		EH	PS	HC
109	-	-	PB	ZE	124			PB	LC
110			PBB	ZE	125			PBB	ZE
111			N	LC					
			ZE	LC					
112				LC					
112 113		М	PS						
112 113 114		М	PS PB	ZE					

表 A3 各节点基本负荷和 EVSE 数量 Table A3 Base load and number of EVSE at each node

Table AS base load and number of EVSE at each node									
电网节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar	EVSE 数量/台	电网节点	有功负荷/kW	无功负荷/kVar	EVSE 数量/台		
1	35	21	7	17	31	14	6		
2	31	14	6	18	31	14	6		
3	42	28	7	19	31	14	6		
4	21	10	4	20	31	14	6		
5	21	7	4	21	31	14	6		
6	70	35	12	22	31	14	6		
7	70	35	12	23	147	70	27		
8	21	7	4	24	147	70	27		
9	21	7	4	25	21	9	4		
10	16	10	3	26	21	9	4		
11	21	12	4	27	21	7	4		
12	21	12	4	28	42	24	8		
13	42	28	7	29	70	210	12		
14	21	3	4	30	52	24	9		
15	21	7	4	31	73	35	13		
16	21	7	4	32	21	14	4		