

自动电压控制中考虑降压减载的协调控制方法

潘凯岩 李绥荣 王玉琴

(东方电子股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 处理电网中设备过载或错峰的传统方法是通过自动负荷控制的方法, 切除优先级较低的负荷, 其缺点是最终会导致部分用户停电。本文在传统的自动电压控制及考虑负荷电压特性的基础上, 通过建立负荷的 ZIP 模型及计算变电站有功负荷和负荷母线电压之间的灵敏度, 从而实现通过投切电容或调节变压器档位的方法来调节电压, 最终达到通过 AVC 来减载的目的, 从而达到了 AVC 与降压减载的协调控制。现场运行情况表明, 本文提出的方法是有效的, 可以通过调节电压的方法达到减载的目的从而保证了供电质量。

关键词: 自动电压控制; 负荷特性; 降压减载; 灵敏度

Application of Voltage-decreasing and Load Shedding based on Load-voltage Characteristics in Automatic Voltage Control

Pan Kaiyan Li Suirong Wang Yuqin

(Dongfang Electronics Corporation, Yantai, Shandong 264000)

Abstract It often happens that the power grid runs beyond its schedule or the power device works beyond its safety restriction. The traditional method is to shed some loads by real-time automatic load controlling system. In this paper, a method of soft load shedding is given by studying the relation of load real active power and its corresponding voltage in the AVC system. The field running results show that this method can meet the real-time demand and supply power to users as much as possible on the basis of power grid safety.

Keywords: automatic voltage control; load characteristics; voltage-decreasing and load shedding; sensitivity

近年来, 自动电压控制 (AVC) 技术得到了充分的发展, 成熟的 AVC 技术逐步应用到各级电网中。AVC 从全网角度分层、分区对电压和无功进行协调优化控制, 是提高电压质量、优化无功潮流分布、降低网损、减轻劳动强度的有效手段^[1]。

在电网系统运行过程中, 对于超计划用电或设备重载运行的情况, 文献[2-4]通过负荷转移的方法来实现消除设备过载的情况, 该方法的缺点是如果转供后依然有设备过载, 则不能达到消除设备过载的目的。文献[5]提出通过负荷自动切除的方法来实现消除过载的情况, 该方法的缺点是短时间内会引起用户停电。

目前对于地区电网负荷特性的分析较少涉及,

而且这些研究主要是调研普查性质, 较少进行定量分析, 未对变电站负荷特性进行深入分析, 分析结果较为粗略。

文献[6]通过计算地区的典型负荷特性的指标的方法分析了地区负荷特性变化规律, 文献[7]分析了影响电网负荷特性的主要因素, 并提出了加强典型行业和用户负荷特性的调研等相应建议。文献[8]针对广域电力系统中负荷节点面广量大的困难提出了基于日负荷曲线的统计综合方法, 得出各负荷节点中行业用电构成的负荷比例。

目前文献通常对负荷特性进行独立研究, 本文通过对地区电网的静态负荷特性及负荷点的动态特性进行分析, 并与自动电压控制系统 (AVC) 的实

际调节相结合：根据自动电压控制系统得到档位及无功补偿设备的动作情况，实时启动相关数据的记录统计分析过程，最终得到短期各变电站有功功率跟随负荷母线电压急剧变化的相关数据，去除负荷本身的变化量后，从而得到实时的 PV 灵敏度系数，同时通过分析变电站负荷的 ZIP 模型进一步从理论上验证计算出的 PV 灵敏度系数的合理性。最后根据负荷的 PV 灵敏度系数及用户需要切除的负荷量计算出需要调节的电压量，通过调节档位或投切电容的方法来实现调节电压，最终实现降压减载的目的。

1 地区电网传统的自动电压控制策略

九区图法是最早被应用到 VQC 的一种控制策略。是通过实时监测变压器低压侧母线电压和变压器高压侧无功功率（或功率因数），并以此作为控制状态量，根据其工作点在各运行区间的对应逻辑关系，得出调节分接头和投切电容器的控制指令。

文献[9]在九区图上针对各区域边界控制上进行了更为细致的划分得到十七区，本文在基于长期的工程应用总结了更符合实际运行状况的各区调节模式，策略调节图如图 1 所示。

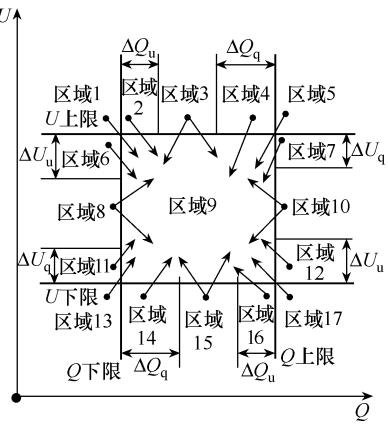


图 1 十七区图示意图

这里以调节设备为电容器或变压器优先，则不同区的调节策略如下。

1) 电压越上限无功越下限 (UHQL)，即在区域 1 内：

- (1) 切电容器。
- (2) 如果控制方式为电压优先，下调分接头。
- (3) 区域联调切电容器。
- (4) 如果控制方式为电压优先，强切电容器。

2) 电压越上限无功正常偏低 (UHQML)，即在区域 2 内：

- (1) 切电容器。

(2) 如果控制方式为电压优先，下调分接头。
3) 电压越上限无功正常 (UHQM)，即在区域 3 内：

- (1) 切电容器。
- (2) 下调分接头。

4) 电压越上限无功正常偏高 (UHQMH)，即在区域 4 内：

- (1) 调节设备方式为电容器优先
①切电容器。
②下调分接头。
- ③如果控制方式为电压优先，强切电容器。

- (2) 调节设备方式为变压器优先

- ①下调分接头。
- ②如果控制方式为电压优先，强切电容器。

5) 电压越上限无功越上限 (UHQH)，即在区域 5 内：

- (1) 下调分接头。
- (2) 如果控制方式为电压优先，强切电容器。
如果控制方式为无功优先，强投电容器。

(3) 如果控制方式为电压优先，区域联调切电容器。如果控制方式为无功优先，区域联调投电容器。

6) 电压正常偏高无功越下限 (UMHQL)，即在区域 6 内：

- (1) 切电容器。
- (2) 区域联调切电容器。

7) 电压正常无功越下限 (UMQL)，即在区域 7 内：

电压正常偏低无功越下限 (UMLQ)。

- (1) 调节设备方式为电容器优先
①切电容器。
- ②判断上调分接头升高电压后有可切的电容器，则上调分接头。其原理就是先升高电压，进入 UMHQL，然后再在下一轮切电容器。

- ③如果控制方式为无功优先，强切电容器。
④区域联调切电容器。

- (2) 调节设备方式为变压器优先

- ①上调分接头。
- ②如果控制方式为无功优先，强切电容器。
- ③区域联调切电容器。

8) 电压正常偏高无功越上限 (UMHQH)，即在区域 8 内：

电压正常偏高无功越上限 (UMHQH)。

(1) 调节设备方式为电容器优先

①投电容器。

②判断下调分接头降低电压后有可投的电容器，则下调分接头。其步骤就是先降低电压，进入UMLQH，然后再在下一轮投电容器。

③如果控制方式为无功优先，强投电容器。

④区域联调投电容器。

(2) 调节设备方式为变压器优先

①下调分接头。

②如果控制方式为无功优先，强投电容器。

③区域联调投电容器。

9) 电压正常偏低无功越上限 (UMLQH)，即在区域 9 内：

(1) 投电容器。

(2) 区域联调投电容器。

10) 电压越下限无功越下限 (ULQL)，即在区域 10 内：

(1) 上调分接头。

(2) 如果控制方式为无功优先，强切电容器。

如果控制方式为电压优先，强投电容器。

(3) 如果控制方式为无功优先，区域联调切电容器。如果控制方式为电压优先，区域联调投电容器。

11) 电压越下限无功正常偏低 (ULQML)，即在区域 11 内：

(1) 调节设备方式为电容器优先

①投电容器。

②上调分接头。

③如果控制方式为电压优先，强投电容器。

(2) 调节设备方式为变压器优先

①上调分接头。

②如果控制方式为无功优先，强投电容器。

12) 电压越下限无功正常偏高 (ULQMH)，即在区域 12 内：

(1) 投电容器。

(2) 如果控制方式为电压优先，上调分接头。

13) 电压越下限无功正常 (ULQM)，即在区域 13 内：

(1) 投电容器。

(2) 升档位。

14) 电压越下限无功偏高：(ULQH)，即在区域 14 内：

(1) 投电容器。

(2) 如果控制方式为电压优先，上调分接头。

(3) 区域联调投电容器。

2 降压减载建模

2.1 负荷建模

1) 静态综合负荷模型

综合负荷模型是指在电力系统分析计算中对负荷特性所作的物理描述或数学描述。本文中对以工业负荷为主的变电站采用 ZIP 模型。这里负荷建模是以变电站的综合负荷为最小单位，而不是传统意义上的单个独立的负荷。ZIP 模型将综合负荷看成由不同比例的三种基本元件组成的，如图 2 所示。

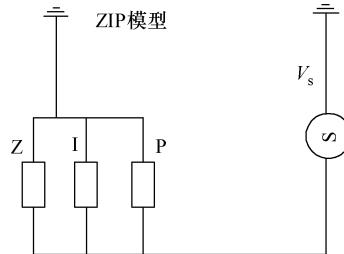


图 2 ZIP 模型

变电站综合负荷的电压特性用数学公式表述出来，就是对应的负荷电压数学模型，可用如下二次多项式表示：

$$P = P_N \left(a_p \frac{V}{V_N} \right)^2 + b_p \frac{V}{V_N} + c_p \quad (1)$$

$$Q = Q_N \left(a_q \frac{V}{V_N} \right)^2 + b_q \frac{V}{V_N} + c_q \quad (2)$$

式中， V_N 为额定电压， P_N 和 Q_N 分别为额定电压时的有功和无功功率， a_p 、 b_p 、 c_p 分别为上述三种有功负荷的组成百分比系数， a_q 、 b_q 、 c_q 分别为上述三种无功负荷的组成百分比系数。

式 (1) 和式 (2) 表明，负荷的有功和无功功率都由三个部分组成，第一部分与电压平方成正比，代表恒定阻抗消耗的功率，第二部分与电压成线性关系，代表恒电流负荷对应的功率，第三部分与电压无关，为恒功率组成部分。可根据实测的电压—负荷静态特性使用最小二乘法拟合求解。上述系数应该满足以下等式约束：

$$a_p + b_p + c_p = 1 \quad (3)$$

$$a_q + b_q + c_q = 1 \quad (4)$$

2) 动态负荷电压特性系数

对于变电站的综合负荷动态模型，由于其用电设备数量很大，各设备的工作状态带有一定的随机

性和时间属性，因此变电站的综合负荷的模型结构很难确定，难以使用一个简单的负荷模型结构来描述。而在电压急剧变化的时候，尤其是此电压变化是由于变压器档位或者无功补偿设备的投运和退出引起的较短时间内，绝大多数设备的运行状态及变电站的运行方式等可以看作是固定不变。在这种情况下，综合负荷的模型结构基本上是相对稳定和不变化的，因此可以使用静态综合负荷模型来描述。此时记录变电站内变压器档位动作和无功补偿设备投退后短期内 PV 连续变化数据，可以使用最小二乘法拟合法求解并得到一个对应的实时负荷模型系数。

3) 基于统计的负荷系数计算

根据得到的各负荷变电站额定有功功率 P_N 和相关负荷电压特性历史存盘数据，利用最小二乘法拟合法对式（1）进行求解，最终可以求得各变电站的综合负荷系数。

2.2 实时 PV 灵敏度系数

通过统计 AVC 在历史调节过程中，以档位或者无功设备动作为起点，实时记录有关功率与电压在一定时间内的变化情况，可以得到短时间内有功随电压变化而变化的曲线数据。通过多次实测数据，可以求得任意时刻选定变电站的负荷母线电压上单位电压值变化引发的有功变化量，该值即为变电站的实时 PV 灵敏度系数。得到的 PV 灵敏度系数和式

(1) 得到的模型系数可以相互验证，也可以用于预判和实时计算实时运行态下变电站负荷母线电压急剧变化在一定时间有功负荷的变化值。每次得到的预判值可以通过后续记录实测数据来进行验证，这样同样也可以对 PV 灵敏度系数再作进一步的修订和改进。

计算方法如下。

实际应用中，PV 灵敏度系数可以通过实测方法来获取。假设 S 为变电站有功负荷对负荷节点母线电压的灵敏度系数，计算公式为

$$S_{pv} = \delta P / \delta V \quad (5)$$

其中

$$\delta P = (P_t - P_0)_{\max} \quad (6)$$

$$\delta V = (V_t - V_0)_{\max} \quad (7)$$

P_t 为 AVC 调节操作开始后 2min 内 t 时刻记录的变电站有功负荷值。

P_0 为 AVC 调节操作下发时刻记录的变电站有功负荷值。

V_t 为 AVC 调节操作开始后 2min 内 t 时刻记录的关联负荷母线电压值。

V_0 为 AVC 调节操作下发时刻记录的关联负荷母线电压值。

3 处理流程

3.1 负荷点有功负荷及其母线电压的获取

AVC 进行变压器档位调节或者无功设备的投退控制时，自动记录相关设备及变电站信息，在预定时间周期内持续获取和保存相关变电站内的负荷和负荷点电压的实时数据。

一般来说，地区电网的 AVC 的监视周期为 30s，如果监控点电压连续 3 个周期都是越限的，则执行遥控处理，即通常的遥控执行周期为 90s，在进行降压减载的协调控制中，在每次 AVC 进行执行遥控的前后，记录上述相关变电站内的负荷及负荷点的电压变化情况作为最终的统计数据。一般来说，以 90s 为周期进行统计数据量已足够多，所得数据按根据动作记录时间分为峰谷平，峰为 8 点到 12 点以及 14 点到 17 点，平为 12 点到 14 点以及 17 点到 21 点，其他时段为谷。

在 AVC 正常运行的情况下记录一个月数据作为最终的统计时间段，然后以时间曲线、数据表格及负荷电压模型分析等多种形式提在档位调节、电容电抗投切后的变电站有功功率和电压变化规律。

3.2 数据预处理

为了保证最后的分析结果正常，在真正开始分析前要进行数据预处理。

预处理主要包括数据过滤和数据截取两个过程。数据过滤将不合理的数据排除在最终的原始数据集合中，而数据截取则是决定单次操作中数据的断面个数，将多余的数据截除掉。

1) 数据过滤

对获取的数据进行分析前要将不合理的数据过滤。不合理数据主要是指那些在记录过程中完全无变化、或者变化超出正常情况的数据。导致异常数据发生的主要原因有：①在数据收集时 SCADA 出现了死数的情况；②调压/无功调节操作未正确完成也会导致不合理数据的出现。

2) 数据截取

每次 AVC 动作保存数据的周期必须足够长，以保证保存的数据比最后分析需要的要多，因此在存盘时会保存很多多余的数据。多余的数据如果不在

分析前截取，会影响分析，甚至导致不能得到正确的结果。由于每个变电站的数据反应速度有差异，数据截取根据各变电站的实际数据曲线进行。

3.3 数据查询和展示

数据查询包括可以查询负荷节点母线实测电压值随时间变化的情况，即 V/t 曲线，变电站有功功率随时间变化的曲线，即 P/t 曲线，以及一个时间段内灵敏度随时间变化的曲线等。

3.4 求解负荷变电站的额定有功功率 P_N

将日期划分为工作日、周末、节假日等类型，同一类型日期再划分为高峰、低谷及平谷三个时间。根据日期与时间段划分，对现有统计历史数据进行分类、过滤及分析、对负荷变电站求解相应日期时间类型的额定有功功率 P_N 。额定有功功率 P_N 主要用于 ZIP 模型求解，其含义为节点负荷母线电压为额定电压时对应的变电站有功功率。

3.5 负荷变电站的 ZIP 模型求解

根据 3.2 求解得到的各负荷变电站额定有功功率 P_N 数据和相关负荷电压特性历史存盘数据，利用最小二乘法拟合法对公式（1）进行求解，最终求得不同日期时间类型下的 a_p 、 b_p 、 c_p 。

得到所有变电站的 ZIP 模型参数后，再通过 SCADA 实时采集数据进行修订和验证。即在 AVC 的统计周期内基于统计数据计算得到 a_p 、 b_p 、 c_p 后，再通过 SCADA 实时采集的负荷有功及相应的母线电压，代入到式（1），以验证 a_p 、 b_p 、 c_p 的合理性，如果通过 a_p 、 b_p 、 c_p 及实采的电压计算得到的负荷有功与实际采集的负荷有功的误差过大，则说明 a_p 、 b_p 、 c_p 存在问题，需要重新对 a_p 、 b_p 、 c_p 进行统计计算。

3.6 静态电压稳定及动态电压稳定校核

根据负荷的负荷特性来通过调节电压的方法来

进行错峰或消除设备过载的持续时间比较短，所以通常不会引起静态电压稳定及动态电压稳定问题，如果地区电网 EMS 应用软件配有在线电压稳定计算模块，则可以将预调节信息及整个电网信息传给电压稳定模块^[10]，由电压稳定计算系统判断是否会引发电压失稳的问题，如果最终计算会导致电压失稳，则不能通过降压减载的方法来进行错峰处理，只能按传统的方法切除部分负荷以保证电网安的全稳定运行，如果地区没有配置电压稳定模块，则应根据母线电压与调节的控制设备（变压器档位、投切电容）的灵敏度关系，计算得到应调节的档位或最大投切量，以保证经过调节后母线电压不出现越限情况，如果母线电压越限，则应立刻进行闭锁以保证电网稳定运行。

4 应用效果分析

本文提出的在 AVC 中综合考虑降压减载协调控制系统已经在广东某供电公司投入运行，在运行过程中首先通过 AVC 系统实时记录相关分析数据（包括变电站综合有功负荷、母线电压、档位、电容器投切）信息等，最终通过最小二乘拟合得到负荷的 ZIP 模型系数以及负荷的有功电压灵敏度系数。

某一断面的相应的峰谷平时段有功灵敏度及 ZIP 模型系数见表 1。从表 1 可以看出，变电站有功电压灵敏度实测值最高为 7.45，最低为 1.49，最高和最低值之间相差 5 倍，没有出现数量级上的差别。

AVC 中综合考虑降压减载的协调控制系统在负荷高峰时可以分区域、厂站、设备来针对用户设置的需要切除的负荷进行切除，处理中首先获取需要切除的负荷总量，最终根据相关变电站的有功电压灵敏度系数得到需要调节的电压量，最终由 AVC 完成相应的档位或电容投切的方式来实现调压从而最

表 1 典型变电站峰谷平有功灵敏度及模型参数列表

片区	变电名称	$S(\text{峰}) / (\text{MW}/\text{kV})$	$S(\text{谷}) / (\text{MW}/\text{kV})$	$S(\text{平}) / (\text{MW}/\text{kV})$	a_p	b_p	c_p
禅城区	季华站	1.49	2.11	1.85	-0.68	1.68	0.00
	百花站	2.05	2.97	3.12	0.07	0.93	0.00
	石湾站	5.14	4.35	3.92	-4.31	5.31	0.00
南海区	桂城站	2.24	2.83	3.21	18.25	-36.67	19.43
	大沥站	2.63	2.33	4.39	-103.14	220.11	-115.9
	二拱站	3.33	3.01	2.49	-0.73	1.73	0.00
顺德区	桂洲站	4.35	3.76	2.98	-0.87	1.87	0.00
	乐从站	4.99	4.18	3.45	-1.14	2.14	0.00
	龙山站	7.45	5.45	5.32	71.53	-146.93	76.40

终达到减载的目的。

5 结论

在 AVC 中考虑降压减载的协调控制方法中通过记录在调节过程中变电站有功负荷与母线电压的变化规律，并统计分析得出变电站综合有功负荷电压特性及影响因素，得到各变电站有功负荷和负荷母线电压之间的变化规律曲线和数学表达式。最终得出在变电站负荷相对稳定时电压变化是否会引起负荷的变化，其变化是否存在相关性以及关键因素。同时，通过负荷的 ZIP 模型来进一步验证所得出的 PV 灵敏度系数的合理性，为进一步的降压减载研究提供理论依据和数据支撑，最终达到节能降损、降压减载的目的。

在 AVC 中综合考虑降压减载的协调控制系统里，由于不直接切除负荷，从而提高了供电的可靠性，同时又不影响原来的 AVC 的自动电压控制功能，软件功能改动较少，易于实现。现场运行结果表明该方法具有一定的通用性，在地区电网中具有一定的推广价值。

参考文献

- [1] 余涛, 周斌. 电力系统电压/无功控制策略研究综述 [J]. 继电器, 2008, 36(6): 79-85.

(上接第 55 页)

从图中可以看出，电流畸变率从补偿前的 29.5% 下降到了 3.82%，说明本设计的有源电力滤波器具有良好的补偿性能。

5 结论

本文对单相并联型有源电力滤波器进行了研究，介绍了谐波检测的一种新方法，并对控制策略进行了分析，在基于 TMS320F28335 的基础上搭建了一台样机，对所讨论的理论进行了实验验证，实验结果表明，该有源电力滤波器具有很好的补偿性能。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
[2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

- [2] 李少谦, 张孟君, 倪小惠, 等. 消除 330kV 变压器过载的自动负荷转移控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 106-108, 115.
[3] 孙涛, 张旭, 张东英. 地区电网故障恢复过程中负荷连续转移策略的研究[J]. 现代电力, 2009, 26(2): 10-13.
[4] 潘凯岩, 刘仲尧. 负荷转供在线辅助决策系统在大型电网中的应用[J]. 电气技术, 2013, 33(5): 54-57.
[5] 潘凯岩, 刘仲尧, 宋学清, 等. 自动负荷控制系统在佛山电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 94-97.
[6] 王春义, 牟宏, 孙伟. 国外典型电网负荷特性分析[J]. 电力需求侧管理, 2013, 15(6): 60-64.
[7] 唐宝, 董征. “十一五”期间南方电网负荷特性分析[J]. 中国电力, 2012, 45(10): 30-33.
[8] 鞠平, 陈谦, 熊传平, 等. 基于日负荷曲线的负荷分类和综合建模[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16): 6-9.
[9] 沈曙明. 变电站电压无功综合自动控制的实现与探讨[J]. 继电器, 2000, 28(11): 60-62.
[10] 张飞华, 罗毅初, 杨勇. 地区电网电压稳定的一般分析方法[J]. 中国科技信息, 2009(20): 16-17, 22.

作者简介

潘凯岩 (1973-)，男，硕士，高工，架构师，从事 EMS/DMS 系统软件的研发工作。

- [3] 戴瑜兴. 智能建筑配电系统谐波及无功的综合补偿研究[Z]. 长沙, 2003: 6-10.
[4] 姜齐荣, 赵东元, 陈建业. 有源电力滤波器-结构、原理、控制[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
[5] 杜少武, 吴义敏, 黄海宏. 一种基于 DSP 的单相谐波检测方法的研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46 (2) : 80-82.
[6] 周林, 庄华, 栗秋华, 等. 单相有源电力滤波器的控制方法[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30 (1): 32-35.
[7] 邢雪菲. 基于 DSP 的有源滤波装置谐波检测及其控制策略的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011: 37-45.
[8] 符晓, 朱洪顺. TMS320F2833x DSP 应用开发与实践 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2013.

作者简介

邵贺峰 (1989-), 男, 甘肃省秦安人, 助理工程师, 从事电网谐波补偿、电能质量控制研究的工作。