

弱节点紧急运行模式解析

柳 焯 哈尔滨工业大学电气工程系 (150001)

【摘要】 在 PV 曲线基于临界功率的数学表述基础上,从供应方、需求方矛盾相互关联的角度,对电力系统弱节点紧急运行模式进行了解析。供需矛盾尖锐的程度,明显影响需求侧用户动态用电行为,考虑用户群体的动态用电行为,对分析和解释电力系统电压失稳和电压崩溃很有必要。

【关键词】 运行模式 态势分析 供需矛盾 电压稳定 弱节点

引言

弱节点是电网中电压稳定裕度比较低下的节点,其运行点接近负荷供应能力的瓶颈极限, PV 曲线的临界点(鼻子点)功率,就是该节点负荷供应能力的瓶颈极限。

当人们研究电压稳定问题时,一般都很注意从供求双方入手分析, PV 曲线描述供应方节点负荷供应能力,负荷的静态特性和动态负荷特性乃是需求方重要属性。运行模式也有类似情况,人们一方面注意从发电、输配电(供应方)提取特征,另一方面注意从需求方提取负荷的各种特征。

对于弱节点运行模式而言,仅仅从供应方、需求方两个侧面分别进行研究是不够的,还需要从供应方、需求方矛盾相互关联的角度进行解析。供需矛盾尖锐的程度,明显影响需求侧用户群体综合动态用电行为。用户群体综合动态用电行为,与负荷的动态特性都是需求侧的重要属性,但性质上却有本质区别。负荷的动态特性是用电装置或器具这类物体在电压和功率变动的条件下,显现出的特性;而用户群体综合动态用电行为,则是人群在某种条件下的一种行动模式。在反映电压稳定性研究成果的文献中,涉及负荷的动态特性的内容比较丰富,而谈及用户群体动态综合用电行为对电压稳定影响者,与之相比极不相称。

1997—11—24 收稿

下面我们将在 PV 曲线基于临界功率的数学表述基础上,对弱节点紧急运行模式进行解析。

1 PV 曲线基于临界功率的数学表述

对于电力网络任何工作点,都可作线性化处理,负荷以阻抗表征,发电机以内部的电势和阻抗为参数。在这种数学模型下,可将电力网络被研究弱节点以外部分,进行戴维南等值。

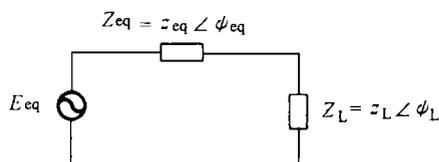


图 1

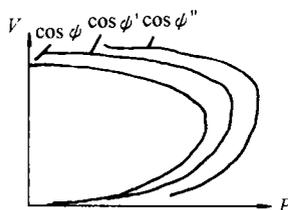


图 2

按戴维南等值电路可绘出 PV 曲线,如图 2,文^[2]运用优化数学的基本原理证明了,在戴维南等值阻抗角与负荷阻抗角不相等情况下,临界点条件就是戴维南等值阻抗模与负荷阻抗模相等:

$$z_{eq} = z_L \quad (1)$$

PV 曲线临界点(鼻子点)功率,即临界

功率

$$P_{CR} = \frac{E_{eq}^2 \cos \varphi_L}{z_{eq} [1 + \cos(\varphi_{eq} - \varphi_L)]} \quad (2)$$

PV 曲线表示 V 是 P 的函数在 $P < P_{CR}$ 时, 给定功率 P 值, 对应上下两个电压值 V_1 和 V_2 。如图 3 所示。

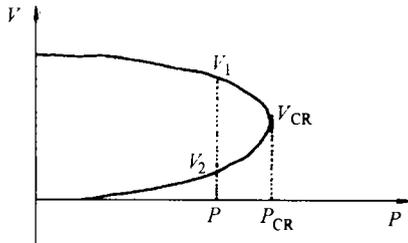


图 3

可以将 V_1 和 V_2 用临界功率 P_{CR} 和给定功率 P 来表述:

$$V_{1,2} = E_{eq} \sqrt{\frac{S(P) \pm \sqrt{S^2(P) - 1}}{2 \frac{P_{CR}}{P} [1 + \cos(\varphi_{eq} - \varphi_L)]}} \quad (3)$$

其中

$$S(P) = \left(\frac{P_{CR}}{P} - 1 \right) \cos(\varphi_{eq} - \varphi_L) + \frac{P_{CR}}{P} \quad (4)$$

与 $V_1(P)$ 、 $V_2(P)$ 上下两点对应的负荷阻抗两个模值 z_{L1} 和 z_{L2}

$$z_{1,2} = z_{eq} [S(P) \pm \sqrt{S^2(P) - 1}] \quad (5)$$

下一节中可以看到, 掌握与 $V(P)$ 对应的负荷阻抗模值 z_L , 对于弱节点态势紧急时的运行模式分析, 很有必要。

在 PV 曲线最右端, $V_1(P)$ 、 $V_2(P)$ 上下两点合并为一点, 即临界点, 此处 $P = P_{CR}$, 负荷阻抗两个模值 z_{L1} 和 z_{L2} 也相应合并为一个模值, 即临界阻抗模值 $z_L = z_{eq}$, 这与式(1)临界点条件是吻合的。

在 PV 曲线最左端, $S(P) = \infty$, 负荷阻抗两个模值中, $z_{L1} = \infty$, $z_{L2} = 0$, 式(3)中 $V_1(P)$ 在 P 趋近于零时为不定式, 运用洛毕达法则可得出 $V_1(P) = E_{eq}$, 对应于开路电压; 此时式(3)中 $V_2(P)$ 等于零, 对应于短路电压。

2 弱节点紧急运行模式解析

弱节点负荷相对较重, 电压稳定裕度比较

低下。然而, 它们并不是任何时间都处于紧急态势之下, 在日调度周期中, 大部分时间其运行模式和一般节点状况接近, 负荷水平、无功功率与有功功率比值 $\tan \varphi_L$ 或 $\cos \varphi_L$ 等特征指标, 随天气分工作日、节假日, 与一般节点是相似的。

2.1 弱节点紧急态势的判断

当高峰负荷来到时, 对弱节点情况应该加强监视, 这并不意味高峰负荷时, 弱节点一定进入了紧急态势, 只是说存在进入紧急态势的可能性。即使弱节点负荷功率达到极限功率(临界点功率)的九成, 即 $P = 0.9P_{CR}$, 也不能仅仅根据这一点, 就判断进入了紧急态势。当 $P = 0.9P_{CR}$ 时, 从 PV 曲线看, 运行工作点离临界点很近, 只要功率再增加 $0.1P_{CR}$, 就会到达临界点, 这只是从一个侧面观察得出的结果; 还需要从其它侧面进行观察, 比如从负荷阻抗侧面等。表 1 展示弱节点负荷功率为不同数值时, 与运行工作点 $V_1(P)$ 、 $V_2(P)$ 对应的负荷阻抗 z_{L1} 、 z_{L2} , 表中各种数量都是相对值, 电压的基值取戴维南等值电势 E_{eq} , 负荷功率的基值取临界功率 P_{CR} , 负荷阻抗模值的基值取戴维南等值阻抗模 z_{eq} , 给定不同负荷功率数值后, $V_1(P)$ 和 $V_2(P)$ 、 $S(P)$ 以及 z_{L1} 和 z_{L2} 分别由式(3)、(4)、(5) 计算出来, 计算中, 戴维南等值阻抗角 φ_{eq} 与负荷阻抗角 φ_L 分别取 75° 和 15° 。

表 1

P	V_1	V_2	$S(P)$	z_{L1}	z_{L2}
1.0	0.57735	0.57735	1.0	1.0	1.0
0.9	0.72820	0.41197	1.16666	1.767592	0.565741
0.8	0.78634	0.33912	1.375	2.318729	0.431270
0.7	0.82914	0.28142	1.64286	2.946306	0.339408
0.6	0.86390	0.21815	2.0	3.732051	0.237949
0.5	0.89362	0.18651	2.5	4.791258	0.208712
0.4	0.91959	0.14499	3.25	6.342329	0.157671
0.3	0.94273	0.10607	4.5	8.887482	0.112517
0.2	0.96361	0.06918	7.0	13.928203	0.071797
0.1	0.98261	0.03392	14.5	28.965476	0.034524
0.0	1.00000	0.00000	∞	∞	0.000000

由表 1 可以看到, 当负荷阻抗模值由 ∞ 逐

步降低到 $1.0z_{eq}$ 时,运行工作点由开路点沿 PV 曲线上半支逐步转移到临界点;负荷阻抗模值由 $1.0z_{eq}$ 逐步降低到 0.0 时,运行工作点由临界点沿 PV 曲线下半支逐步转移到原点。

当负荷功率从 $P = 0.9P_{CR}$ 变到 $1.0P_{CR}$ 时, z_{LI} 将从 $1.767592z_{eq}$ 变到 $1.0z_{eq}$, 在负荷的阻抗角不变的假设下,这相当于给 $1.767592z_{eq}$ 再并联一个模值为 $2.302775z_{eq}$ 的阻抗, $2.302775z_{eq}$ 对应着十分庞大的设备容量,从表 1 可以看到,负荷功率 $P = 0.8P_{CR}$ 时, $z_{LI} = 2.318729z_{eq}$, $2.302775z_{eq}$ 比它略小,意味着其对应的设备额定容量,比负荷功率 $P = 0.8P_{CR}$ 时的设备额定容量还要略大。因此,从阻抗模值的侧面观察,负荷功率从 $P = 0.9P_{CR}$ 变到 $1.0P_{CR}$, 是一个不可小看的变动,在没有事故的情况下,这一变动要伴随着新设运庞大的设备额定容量。由此不难理解,不能根据负荷功率较重这一个特征指标,判断是否进入紧急态势,还应当考察发展趋势中,负荷阻抗模值近期明显下降的概率。这种概率在下述情况下比较高:

a. 奇热或奇寒的侵袭,刺激人们投运设备额定容量大的空调等电器,或加大其档次。

b. 雷电和疾风暴雨可能引起供电点范围不同类型的故障,导致该节点总体负荷阻抗模值大幅度降低。

c. 工业大额定容量设备的投入和民用高峰的会合。

d. 日常用电高峰与非常用电(如防洪排涝或大规模抗旱用电)交会。

e. 上述两种或多种情况的综合。

以上内容都是从需求侧考察,还应当从供应侧考察。供应侧的发电机组或输电线路如果发生故障,可能导致戴维南等值电势 E_{eq} 下降,或戴维南等值阻抗模 z_{eq} 升高。从式(2)看, E_{eq} 下降或 z_{eq} 升高都将导致临界功率降低;此外, z_{eq} 的升高,以其为基值的负荷阻抗模值的标么值将降低,这些变化都可能意味着险情。

2.2 供需矛盾与用户的个体及群体行为

综上所述,弱节点紧急运行模式有两个突

出的特征:一个是负荷功率接近临界功率,另一个是负荷阻抗模值近期明显下降的概率较高。这两个特征使该模式的运行工作点处于 PV 曲线上半支尾部陡降段,或进入 PV 曲线下半支。这里供求矛盾十分尖锐,节点负荷总功率已无多少增大的余地,甚至要减少,这不等于说,单个用户的用电功率已无可能增长,假如某用户加开一台额定容量较大的设备,由于电压的明显下降,其所得功率明显小于额定值,但这台设备还是能够得到相当可观数量功率的。既然节点负荷总功率已无多少增大的余地,甚至要减少,为什么该台设备还能够得到相当可观数量的功率呢?这基本上来源于电压明显下降所导致的功率再分配,新投设备(包括该台设备)的投入引起电压明显下降,原来运行着的设备(包括该用户的原投设备)的功率明显降低,这使新投设备获得可观数量功率成为可能。如果该用户新增功率大于原投设备减少的功率,则其总用电功率就增大了,说明在供求矛盾尖锐时,单个用户的用电功率还是可能增长的。就用户行为而言,哪一个用户的负荷阻抗模值减少相对较快,其用电功率就有可能增加,新开大容量设备或改换原投大容量设备的档次,都会使用户的阻抗模值明显减少。虽然单个用户的用电功率可能增长,但是并不能满足其用电需求,原来运行着的设备,其功率下降得比电压更快,新开设备又由于电压低下,其功率也明显小于额定值。当弱节点下面的用户觉察到,其用电需求不能得到满足的根源,往往是由于电压下降时,将引发他们配置调压或稳压装置来保证电器的额定输出。有的大容量电器,自身就附有稳压部件。

下面再来分析用户群体行为问题,当采取某种行动的个体为数相当少时,这种行动属个体行为;当采取某种行动的个体为数较多,且投入的设备容量较大时,这种行动就属群体行为了。在弱节点紧急运行模式中,供不应求的矛盾尖锐,因此加大原已运行的有关大容量电器的档次、新开有关大容量电器,一般要形成群体行为。用户们的用电需求得不到满足,就要千方百

计采取行动,而可能采取的行动,主要是增投设备容量,即加大有关大容量设备输出功率的档次,或新开有关大容量设备,此种群体行为使负荷阻抗模值明显降低,导致运行工作点在 PV 曲线陡降段下滑,引起电压明显降低。这将使绝大多数参与群体行动用户的用电需求得不到满足,他们并不了解电压的态势,一般电气设备又不指示其电压和输出功率值,他们在需求得不到满足时,总以为增投的设备容量还不够,还要继续增投;此外还会引发一些新参与者,他们原先并未打算增投设备容量,电压降低后,深切感到功率不足,才下决心增投设备容量。增投引起电压明显下降,电压明显下降又带来新的增投,形成一个恶性循环,直到有关大容量电器的档次都到尽头、有关大容量电器都已开启为止。这种恶性循环好似一个大量‘吞噬’新投设备容量的‘无底洞’,社会发达程度愈高,大容量设备(如空调、制冷设备之类)的后备容量愈多,上述恶性循环吸纳的新投设备容量愈大,弱节点阻抗模值将变得愈小,循环结束后运行工作点电压愈低。前面曾说,负荷功率 $P = 0.8P_{CR}$ 所对应的设备容量很庞大,慢说新投这样大的设备容量,就是比它再大得多的设备容量,也吸纳得了,要晓得运行工作点转入 PV 曲线下半支以后,那里阻抗模值都很小,极端情况在原点,原点阻抗模值为零,对应无穷大设备容量。

上述恶性循环与人群的行为密切相关。与这种恶性循环同时起作用,还存在一个与设备的稳压行为密切相关的恶性循环,稳压装置一般采用改变与负荷串联阻抗的途径来实现稳压,因此阻止用电设备电压下降的稳压调控,要降低阻抗模值,采用其他途径来实现稳压,也要降低阻抗模值,而阻抗模值的降低,只能造成电压下降,电压差距(电压与其目标值的差距)加大的后果,此种后果将使稳压器件加大其调节力度,进一步降低阻抗模值,这回过头又会使电压下降,电压差距加大,稳压器件进一步加大其调节力度,……,形成另一个恶性循环,直到全部稳压器件的调节范围都到尽头为止。

当相关大容量电器的档次大多达到尽头、

相关大容量电器大多已经开启、稳压器件的调节范围大多到尽头之时,上述两种恶性循环才近尾声,弱节点紧急运行模式的后期阶段将由此开始,运行工作点可能趋近或越过临界点,电压可能降得相当低。在紧急运行模式后期阶段,当上述两种恶性循环结束或基本结束时,如果电压已降到足够低,则第三个与负荷动态特性相关的恶性循环就可能要起作用了,我们知道,异步电动机的最大电磁转矩基本上与电压的平方成正比,电压降得足够低,一些异步电动机的最大电磁转矩将变得小于反抗转矩,致使滑差率和电流显著上升,其后果不但将使这些电动机的阻抗模值显著下降,而且还将使它们的阻抗角增大,这些都将刺激电压继续迅速下降,回过头又会使另一些异步电动机的最大电磁转矩变得小于反抗转矩,构成又一个恶性循环。电动机的过载保护,如热继电器或保险丝,在转矩平衡破坏、滑差率和电流显著上升时,多半不会起作用,热继电器或保险丝是按正常电压下能承受启动电流整定的,电压低下时电动机电流,一般小于正常电压下的启动电流。电压很低时,低电压继电器或掉电保护装置可能起作用。我们希望低层电压等级的低电压保护先于高层者起作用,这样停电面积可以减小。

弱节点紧急运行模式中,由于用户群体行为引起的恶性循环,并不是绝对不可避免的。首先,要广泛宣传其成因和危害,使大家认识到,只要在紧急态势时都不参与增投设备容量的行为,闭锁调压器件,节点负荷阻抗模值就有可能停止下降,从而遏制电压下滑的势头。只要把群体增投设备容量恶性循环和稳压恶性循环管制住,电压就不会降得很低,就可能切断这两个恶性循环与异步电动机特性恶性循环的钩连,避免电压崩溃的产生。其次,在电压态势紧急时,要通过现代化手段及时向广大用户发出警报信息,使他们了解情况。我们认为,需求侧管理(DSM)有了一个新的研究方向,就是研究如何在电压态势紧急时,综合运用经济的、法律的、道德的、教育的、行政的手段,配合实施紧急负荷控制和紧急无功补偿,以期达到预

防电压崩溃的目的。

3 结论

弱节点紧急运行模式解析中,将数学分析、工程分析和模式分析结合起来,有助于深入,能为研制反电压崩溃装置奠定良好基础。

供需矛盾尖锐的程度,明显影响需求侧用户动态用电行为,考虑用户群体的动态用电行为,对分析电力系统电压失稳和电压崩溃很有必要。

如何在电压态势紧急时,配合实施紧急负荷控制和紧急无功补偿,是需求侧管理(DSM)的一个新的发展方向。社会愈发达,人民生活水平愈高,愈需要在弱节点规范人们的用电行为。

参考文献

1 Atsushi Kurita, Takeichi Sakurai. The power system failure

on July 23 in Tokyo proceedings of the 27th conference on decision and control. Austin, Texas, Dec. 1988.

2 葛维春. 电力系统电压稳定性与电压崩溃的研究. 哈尔滨工业大学与华北电力大学联合培养博士学位论文, 1992

3 Koishikawa S, Ohsaka S, Suzuki M, Michigami T, Akimoto M. Advanced control of reactive power supply enhancing voltage stability of a bulk power transmission system and a new Scheme of monitor on voltage security. CIGRE 1990 Report 38/39 - 01.

4 Hamond Y, Trotignon M, Lesigne J F, Tesseron J M, Lemaitre C, Bourgin F. Analysis of a voltage collapse incident and proposal for a time - based hierarchical containment scheme. CIGRE 1990 report 38/39 - 02.

5 Sekine Y, Takanashi K, Ichida Y, Ohura Y, Tsuchimori N. Method of analysis and assesment on power system voltage phenomena and improvement including control strategies for greater voltage stability margins. CIGRE 1992 Report 38 - 206.

ANALYSIS OF URGENT OPERATING PATTERNS FOR WEAK NODES

Liu zhuo (Harbin Industrial University, 150001, Harbin, China)

Abstract In this paper, the urgent voltage operating patterns of the power systems are studied. Based on the mathematical description of PV curves in terms of the critical power, it is analyzed from the viewpoint of contradictory between the supply and demand sides. Sharpness of the supply - demand contradictory obviously influence the user dynamic behavior of the demand side. During discussion with regard to voltage instability and voltage collapse, it is an unnegligible side to consider dynamic behavior of the user crowd.

Keywords Operating pattern Volage state and tendency analysis Supply - demand contradictory Voltage stability Weak node

许继公司十种高新技术产品通过国家鉴定

XWJK-3000 型变电站微机监控系统

WYD-100 型微机运动终端

WXH-100 系列微机线路保护装置

WDR-100 系列微机电容器保护装置

YTF (S) -500 型远方跳闸信号传输装置

SF-800 型数字式收发信机

SF-600(601) 集成电路收发信机

WFW-1 型微机防误闭锁装置

WGL-3 型微机大机组故障录波分析装置

PANS/2 电网调度系统

系列静态继电器:

JL-30 电流继电器 JY-30 电压继电器

SS-94 时间继电器 JCH-4 重合闸继电器

JC-7 冲击继电器 JX-3 闪光继电器

JFY-1 负序电压继电器 JCD-3 差动继电器

JG-31,32 功率方向继电器