

# 基于电压稳定裕度的低压减载方案研究及其工程实践

刘柏私<sup>1</sup> 颜伟<sup>2</sup>

(1. 四川电力调度中心 四川 成都 610041; 2. 重庆大学电气工程学院 重庆 400030)

摘要: 首先对电压稳定仿真方法进行了介绍和分析, 进而对低压减载方案和策略进行了对比。针对当前工程实际情况, 提出了一种基于电压稳定裕度的低压减载方案, 并对其工程实践进行了简单的阐述。

关键词: 电压稳定; 低压减载

Abstract: At first, the simulation methods of voltage stability are introduced and analyzed. Then, the low-voltage load shedding schemes and strategies are compared. Aiming at the actual engineering, a low-voltage load shedding scheme based on voltage stability margin is proposed. At last, the engineering practice of the proposed method is described briefly.

Key words: voltage stability; low-voltage load shedding

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0058-02

## 0 引言

电力系统电压稳定长期以来一直是电力公司所极为关注的问题。近年来, 电压失稳事故在全世界的不同电力系统中均有发生, 且造成了系统的大停电事故<sup>[1]</sup>。因而, 国内外电压稳定问题成为了关注的热点之一。近几年来, 电力系统日益向大机组、大电网、超高压和远距离输电发展, 加上经济增长等因素导致负荷的不断增长, 当某些线路传输功率超过其传输能力时, 就会引发电压失稳, 从而被迫切除很多负荷造成很大的经济损失, 甚至系统瓦解。因此对电压稳定性的研究势在必行。

## 1 仿真方法

### 1.1 连续潮流法

#### 1.1.1 连续潮流的模型

现有文献研究中提出了很多种连续潮流模型, 有负荷型连续潮流、支路型连续潮流、故障型连续潮流、控制型连续潮流等<sup>[2]</sup>。此处重点介绍负荷型连续潮流模型, 如下极坐标系统下的常规潮流方程可写成

$$P_{Gi} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$P_{G0}(1+t) - P_{L0}(1+t) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{Gi} - Q_{L0}(1+t) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

式中  $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  为发电机出力;  $U_i$ 、 $\theta_i$  为节点  $i$  的电压幅值和相角;  $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  为节点  $i$  的负荷;  $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  为节点导纳矩阵第  $(i, j)$  个元素的实部和虚部;  $n$  为节点数目。

若以参数  $t$  来表示发电机和负荷的增长, 则有

$$P_{Gi} = P_{G0}(1+t) \quad (5)$$

$$P_{Li} = P_{L0}(1+t) \quad (6)$$

$$Q_{Li} = Q_{L0}(1+t) \quad (7)$$

$$0 \leq t \leq t_{cr} \quad (8)$$

其中, 参数  $t=0$  对应基本的发电机出力 and 负荷水平;  $t=t_{cr}$  表示临界点的出力 and 负荷水平。

将变化的出力 and 负荷的表达式代入潮流方程, 得到新的潮流方程。

用矩阵和向量形式表示, 则为

$$H(X, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq t_{cr}) \quad (9)$$

新的潮流方程的状态变量为  $[X, t]^T$ , 即  $[U, \theta, t]^T$ 。由上式可以看出, 连续潮流方程类似于常规潮流方程, 只是把负荷增加作为参数加进方程中。随着负荷的增加, 相应增加发电机的发电量, 重新形成新的潮流方程。

#### 1.1.2 连续潮流的算法

图1是连续潮流法的基本实现过程。

从初始潮流点出发, 随负荷的增加, 不断用预测/校正算子来连续求解潮流(系统的运行点), 得到负荷增长过程中一系列状态的潮流解, 包括鼻尖点附近以及越过鼻尖点的一系列状态。与常规的分析静态

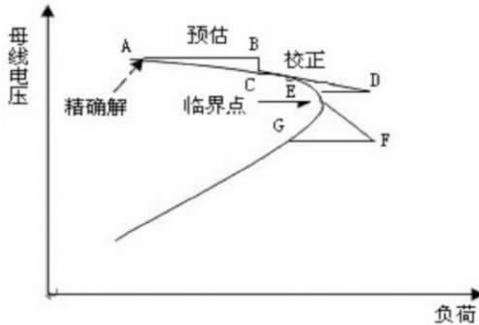


图1 连续潮流计算的预测-校正图

电压稳定性的潮流方法相比,连续潮流方法的优点在于能充分考虑系统的非线性以及参数对系统静态电压稳定性的影响,提供比常规潮流更丰富的信息,克服常规潮流在鼻尖点附近由于雅可比矩阵奇异导致的不收敛问题。当求得临界状态的潮流解后,也就得到了系统距离鼻尖点的裕度。连续潮流法是目前求取临界值比较有效的方法。

### 1.2 ELSI 指标分析方法

利用文献[3]提出的一个新的局部性电压稳定指标——扩展线路电压稳定指标 ELSI (extended line stability index),以及该指标的计算方法及其在实时环境中实施的应用技术。

该新方法的理论基础是在任何复杂输电系统中,只要有一条线路(支路)的负载水平超过其最大传输容量,系统就会失去电压稳定。在某一系统状态下,线路的最大传输容量可通过如下准则来进行确定:在送端节点电压存在的情况下,由于足够大的线路载荷水平以及线路阻抗而使得受端节点电压不存在数值解的话,则该线路载荷水平达到了线路的最大传输容量。也就是说,如果任一条线路失去电压稳定,则整个系统就会在该状态发生电压崩溃。

该理论认为,如果系统中某一线路的 ELSI 指标在数值上接近于 1.0,则认为该系统处于静态电压失稳的临界状态。

### 1.3 低压减载策略

#### 1.3.1 常规低压减载策略

该策略包含低电压装置启动门槛值判断及其对应的切负荷整定方案。首先,系统对装设了减负荷装置的母线电压进行判断。如果电压没有低于门槛值,则装置不动作。如果电压达到装置启动的门槛值,则执行切负荷过程。在切负荷过程当中,每切除一轮负荷以后,就进行一次潮流计算。例如:若某一站点电压低于装置的第一轮启动值 0.85,则装置动作一轮,

然后计算潮流。若此时电压高于装置第二轮启动值 0.82,则装置停止动作;若此时电压低于第二轮启动值 0.82,则装置动作第二轮,然后计算潮流,以此类推。若三轮动作完后电压还不能满足要求,停止切负荷操作。

#### 1.3.2 裕度指标判断+低电压判断+低电压减负荷整定方案

该策略(后称“策略1”)仍然设3个基本轮,每轮的切负荷量和电压门槛值设置都同低压减载策略,ELSI 指标门槛值为 1.05。该策略同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,只要任一判据低于门槛值,则装置开始动作切负荷,直到电压和指标值都满足要求,则停止切负荷。若装置动作三轮,此时不管电压和指标是否都已满足要求,装置都会停止切负荷。

#### 1.3.3 裕度指标判断+低电压判断+裕度指标整定方案

在该策略(后称“策略2”)中,同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,其中低电压判据的动作方案同现有的低压减载策略,ELSI 指标门槛值设为 1.05。指标判据的动作方案是一旦出现指标值低于门槛值,则切除站点所带负荷量的 10%,若还不满足要求,则继续切除剩余负荷的 10%,以此类推,直到指标值满足要求则停止切负荷。

#### 1.3.4 裕度指标判断+低电压判断+裕度指标切负荷量+低电压减负荷整定方案

在该策略(后称“策略3”)中,装置的启动门槛值为:ELSI 小于 1.05,母线电压根据低电压策略的门槛值。策略整定方案的切负荷轮次按照现有低电压减负荷装置整定方案执行,即设置 3 个基本轮,每轮的可切负荷量按低压减载策略执行。但每次切除的负荷量至少为站点剩余负荷的 10%,即每次切除的负荷总量要达到站点剩余负荷的 10%。例如:若某站点指标值低于门槛值,则计算该站剩余负荷的 10%,假如为 10 MW,而整定方案中每轮的切负荷量分别为 7 MW,此时按多切原则,同时切掉一轮和二轮 的 7+7=14 MW 负荷。

#### 1.3.5 3 种策略的特点

低压减载策略只有低电压判据,一旦有安控装置的地点的电压幅值低于电压门槛值,则装置开始动作切负荷。

“策略1”同时考虑了低电压判据和裕度指标判

(下转第 83 页)

由于微电源的发电成本高于售电价格低于购电价格，因而在此期间有微电源满足负荷的需求，超出部分再购电；在峰段期间，由于微电源的发电成本低于售电价格，因此在此期间，各微电源按额定功率发电，超出负荷的部分，售出给主电网。此时微电源的出力情况与图 6 相符。当  $\alpha:\beta = 1:1$  时，即运行成本与环境治理成本以 1:1 加权，通过优化算法计算后，其微电源出力情况与图 5 相符。

## 4 结 论

主要研究了在满足负荷需求与分布式电源出力限制的前提下，同时考虑发电成本与有害气体排放成本，提出了微电网环保经济调度的数学模型。针对发电成本与排放成本的不同权重，运用遗传算法进行优化调度，并用实例验证了所建立模型的合理性。

### 参考文献

[1] 鲁宗相,王彩霞,闵勇,等.微电网研究综述[J].电力系统自动化,2007,31(19):100-107.

[2] 李胜,张建华,李春叶.微网(Microgrid)的并网运行方式探讨[J].太原理工大学学报,2009,40(2):184-187.

[3] Haziargyriou N,Asano H,Iravani R,et al. Microgrids[J]. IEEE, Power & Energy Magazine,2007,5(4):78-94.

[4] 郑漳华,艾 芊.微电网的研究现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2008,32(16):27-31.

[5] 陈达威,朱桂萍.微电网负荷优化分配[J].电力系统自动化,2010,34(20):45-49.

[6] 艾欣,崔明勇,雷之力.基于混沌蚁群算法的微网环保经济调度[J].华北电力大学学报,2009,36(5):2-6.

[7] Mohamed F A,Koivo H N. SvsLern Modeling and On-line Optimal Management of Microgrid Using Multi-objective Optimization [C]. International Conference on Clean Electrical Power,2007(5):148-153.

[8] Pudjianto D,Strbac G. Investigation of Regulatory Commercial Economic and Environmental Issues in Microgrid[J]. International Journal of Distributed Energy Resources,2006,2(3):245-259.

[9] 丁明,包敏,吴红斌.分布式功能系统的经济调度[J].电力科学与技术学,2008,23(1):13-17.

[10] 周明,孙树洞.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999:18-31.

[11] 雷英杰,张善文,李续武,等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2005:11-30.

[12] 邱晓燕,夏莉丽,李兴源.智能电网建设中分布式电源的规划[J].电网技术,2010,34(4):7-10.

### 作者简介:

王 彪(1985),男,硕士,四川省电力科学研究院,研究方向为电力系统运行与控制,从事工作为电网分析;

陈光堂(1986),男,硕士研究生,研究方向为微电网经济运行。

(收稿日期:2011-08-10)

(上接第 59 页)

据两个判据,能够保证当系统某处出现静态电压稳定问题而电压值还较高时,装置能及时地进行切负荷操作。切负荷轮次,每轮切负荷量也完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

“策略 2”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,此策略中指标判据没有切负荷轮次以及总的切负荷量的限制,这与实际情况是不相符的。做这个策略的目的是为了清楚地知道当某个站点现有安控装置 3 个基本轮的负荷量全被切掉后,指标值还不能恢复 > 1.05 的情况下,这个站点到底要切掉多少负荷才能使指标值恢复到 1.05 以上。

“策略 3”同时考虑了低电压判据和裕度指标判据两个判据,按不少切除原则能保证一次性切除足够的负荷量。且切负荷轮次、每轮切负荷量完全按照现有的低压减载策略执行,具有很强的可操作性。

## 2 结 论

对低压减载研究中常用的仿真方法及减负荷策略等进行了综述、对比及分析,指出了各方法的优劣,并对基于电压稳定裕度的低压减载方案及其工程实践进行了分析,拓宽了当前工程中低压减载的思路和方法,具有工程指导意义。

### 参考文献

[1] 周双喜,朱凌志.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.

[2] 王锡凡,万方良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.

[3] 李文沅,余娟,汪洋,等.通过辨识电网薄弱环节实时识别电网电压稳定性的方法[P].中国专利:200710092710.1,2008-02-06.

(收稿日期:2011-07-05)