

基于资金运营理论的配电网 D-STATCOM优化配置

基于10 kV配电线路的等效模型,提出了配电网抵御电压暂降所需D-STATCOM配置容量的计算模型。引入资金运营理论,建立了一种以投资回收期为指标的D-STATCOM优化配置模型,根据线路遭遇电压暂降历史数据和线路用户低压脱扣装置使用情况,为10 kV线路配置D-STATCOM提出优化决策和建议。最终通过对深圳电网某10 kV线路进行仿真分析,验证了方法的可行性和准确性。

曹华珍¹ 莫一夫² 林小朗³ 张勇军²/1.广东电网公司电网规划研究中心
2.华南理工大学电力学院 3.深圳供电局有限公司电力调度控制中心



曹华珍/高级工程师

关键词/Keywords

电压暂降·
资金运营理论·
D-STATCOM·
低压脱扣·

电网电压暂降引发的城市大面积低压脱扣,使得电网突发性损失大量负荷,成为电网运行可靠性的一个巨大的威胁。毫无疑问电压暂降已成为影响电能质量的头号问题^[1]。

STATCOM在性价比、控制的复杂程度和装置实现的功能等方面具有明显的优势,更适用于较大容量的用户^[2],因而成为解决电压暂降和电压失稳^[3]的主要手段和措施。很多研究^[4-5]通过仿真分析了D-STATCOM抑制电压暂降的实际效果。

受制于D-STATCOM的价格,在工程应用中往往需要对其进行优化配置方法进行研究。在国内,文献[6]提出了一种以极限切除时间目标的优化方法;文献[7]针对高压配网,以线损、电压暂降损失和设备投资费用之和为目标函数进行优化。在国外,文献[8-9]利用各

种不同的算法去确定STATCOM在系统中的最佳位置、大小以及容量。以上方法由于未能充分考虑实际情况中用户低压脱扣装置的整定值以及配电网遭遇的电压暂降情况,因而对电压暂降的成本估计可能会跟实际情况相差很大,优化结果的正确与否也不可而知。随着电能质量监测仪被广泛使用,全面采集配网电压暂降数据变得更为可行,通过实际运行数据去配置D-STATCOM无疑能得到更加良好的效果。

为兼顾配电线路抑制电压暂降的能力和和经济性,本文基于资金运营理论,建立以投资回收期最小为目标的D-STATCOM优化配置模型,并以深圳电网某10 kV线路的实际运行数据进行仿真,验证了方法的有效性,并给出相关建议。

电压暂降仿真模型的建立

1. 10 kV配电线路等效模型

选定某条10 kV线路,对上层电网进行等效处理,得到如图1所示的10 kV线路等效模型,其中,每个负荷均带有低压脱扣装置, V_{SH} 为模型所接的系统电源电压; V_H 为配电侧的电压幅值; X_{SH} 为系统等效电抗; P_L+jQ_L 和 P_H+jQ_H 分别为负荷和系统的视在功率。此外,每个负荷

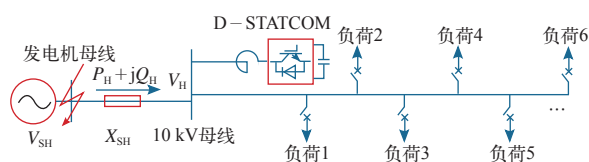


图1 10 kV线路等效模型

国家自然科学基金项目资助(51377060),
中央高校基本科研业务费专项资金资助
(2013ZM0013)。

都装有带低压脱扣功能的低压断路器。

D-STATCOM在10 kV母线处接入,检测接入点母线电压变化,采用定电压控制。

2. 10 kV线路D-STATCOM配置容量确定方法

根据线路上所有用户的信息来设置负荷参数以及负荷的低压脱扣装置的动作整定值。

通过在发电机母线处设置不同的故障,来模拟外部故障导致的电压暂降传播到该条10 kV线路上的情况。一般选择某类电压暂降中最为极端的情况,然后逐渐增大D-STATCOM的投入容量,不断观察各个负荷低压脱扣装置的动作情况,直到投入足够容量的D-STATCOM将电压暂降幅值抬升到所有负荷的低压脱扣装置动作值以上,而保证该条线路不会出现切除负荷现象,最终得到为使线路上所有负荷均能抵御该类电压暂降所需要的D-STATCOM配置容量。但由此确定的补偿容量可能会很大,投资效益受影响,为此本文提出了基于资金运营理论的配置方法。

D-STATCOM优化配置模型

文献[9]在其使用萤火虫算法优化的过程中,提出了一种D-STATCOM的配置模型,该模型把电压暂降导致的经济损失和D-STATCOM投资费用求和后得到总成本,并在不断优化的过程中,使总成本逐渐变小。资金运营理论则更加强调资金的流转速度和资金投入后的预期效果,本文引入资金运营理论,提出一种以投资回收期为指标的D-STATCOM配置模型。

定义D-STATCOM的初始投资为

$$C_0 = \sum_i \delta Q_{Ci} \quad (1)$$

式中, δ 为D-STATCOM的单价,万元/Mvar(包括设备费用和安装人工费用); i 为配电网内有 i 台D-STATCOM; Q_{Ci} 为配电网第 i 台D-STATCOM的配置容量。

定义D-STATCOM每年的维护运行费用为

$$C_m = \alpha C_0 = \alpha \sum_i \delta Q_{Ci} \quad (2)$$

一般情况下,每年的运行维护费用等于初始投资乘以一个系数 α ,其取值为0~10%。

定义安装D-STATCOM后每年可减少电压暂

降导致的停电损失为

$$C_r = \sum_k P_{Lk} f_k l \quad (3)$$

式中, f_k 为安装D-STATCOM后可减少线路中导致切负荷的电压暂降,次/年; k 为不同的电压暂降类型; P_{Lk} 为对应切除的负荷量,MW; l 为每次电压暂降造成的用户停电经济损失,万元/MW。

设用户安装D-STATCOM后,每年能减少因电压暂降而产生不合格品所造成的经济损失为 β 万元。若D-STATCOM使用寿命为 T 年,要使得投资有回报,在使用寿命期内,安装D-STATCOM后减少的电压暂降经济损失不小于减少的电压暂降经济的初始投资和运行维护费用,即

$$T(C_r + \beta) \geq C_0 + TC_m \quad (4)$$

代入整理后,可得下式

$$T \geq \frac{\sum_i \delta Q_{Ci}}{\sum_k P_{Lk} f_k l - \alpha \sum_i \delta Q_{Ci} + \beta} = P_t \quad (5)$$

式中, P_t 为投资回收期。

由式(5)可知:当“减少的电压暂降经济损失”曲线斜率越大,投资回收期越小,整体趋势如图2所示。毫无疑问,投资回收期 P_t 越小,经济性越明显。接下来,将使用该模型进行算例分析。

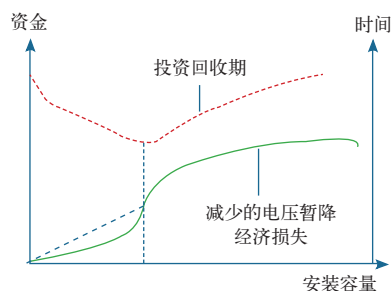


图2 投资回收期趋势图

深圳某配电线路情况描述

该市的大部分配电网供电半径较短,某些高新技术产业区内高敏感性负荷集中,对电压质量有着较高的要求。

图3为某配电线路中一家公司2013年所遇到的电压暂降情况。

如表1和表2所示,分别对电压暂降的持续时间和电压暂降的幅值分布情况作了统计。

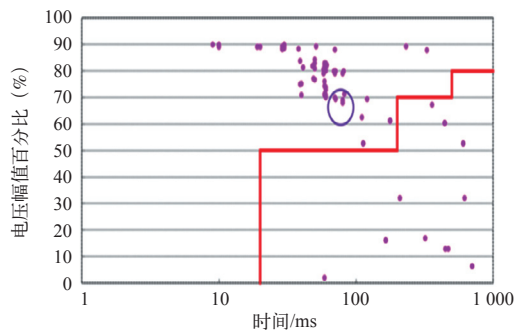


图3 电压暂降具体分布情况

表1 电压暂降持续时间分布情况

持续时间/ms	次数	百分比 (%)
<20	4	7
20~40	12	21
40~80	29	51
80~120	4	7
>120	8	14

表2 电压暂降幅值分布情况

暂降幅值 (pu)	次数	百分比 (%)
0.85~0.9	18	24
0.8~0.85	22	29
0.7~0.8	20	26
0.6~0.7	6	8
0.3~0.6	4	5
<0.3	6	8

由表1和表2的统计可知：该公司2013年遭遇的电压暂降跌落幅值在70%额定值以上的占79%，对应平均跌落时间108 ms；电压暂降跌落幅值在60%额定电压以上的占87%，对应平均跌落时间110 ms；电压暂降跌落幅值在30%额定电压以上的占92%，对应平均跌落时间113 ms。

仿真分析

仿真以该公司所在配电线路为例，采用如图1所示模型，其中，配电线路的导线型号采用LGJ-240，负荷之间的线路长度均为500 m。再以BPA电力系统分析软件为工具，最终得到该条线路为抵御某类电压暂降所需的配置容量。

设置负荷1~负荷6分别为0.3 MW、0.8 MW、0.1 MW、0.8 MW、0.2 MW和0.8MW，且功率因数统一设为0.9。

1. 低压脱扣装置参数设置

根据供电部门的调查：用户使用的瞬时动作的欠电压脱扣器占96.7%；带延时的欠电压脱扣器占3.3%。具体调查结果（以pu表示）如表3所示。

表3 低电压脱扣器动作电压与动作时间分布

动作值 延时	<40%	40%~50%	50%~60%	60%~70%	70%~100%	总计
<20 ms	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20~40 ms	0.0	15.4	23.1	0.0	0.0	38.5
40~60 ms	0.0	30.8	7.7	7.7	0.0	46.2
60~70 ms	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	7.7
>70 ms	0.0	7.7	0.0	0.0	0.0	7.7
总计	0.0	61.5	30.8	7.7	0.0	100.0

根据表3的调查结果，并考虑到优先保证低压减负荷模型动作的选择性，动作电压整定值均采用上表中所划分区间的上限值，对低压减负荷模型参数的具体设置如表4所示。

表4 低压脱扣装置的参数设置

负荷编号	总容量/MW	占母线总容量比例 (%)	动作整定值 (pu)	延时/周波
1	0.3	10	0.7	3
2~3	0.9	30	0.6	3
4~6	1.8	60	0.5	3

2. 电压暂降过程的设置

根据前文对电压暂降的情况统计，设置电压暂降的过程，如表5所示。

表5 故障过程仿真参数设置

分类编号	电压暂降类型 (pu)	发生概率 (%)	极端情况母线电压幅值 (pu)	持续时间/周波
故障1	暂降幅值≥0.7	79	0.7	5
故障2	暂降幅值≥0.6	87	0.6	5
故障3	暂降幅值≥0.3	92	0.3	5

如图4所示，在第三个周波的时候，发电机母线处发生短路故障，一直到第八个周波的时候，线路故障消失，电压恢复正常。整个过程中，10 kV母线出现一个电压暂降的过程。

3. 仿真过程及结果

按照上文10 kV线路D-STATCOM配置容量确定方法，开始D-STATCOM的投入容量为0 Mvar，每次增大0.1 Mvar，得到为抑制三类电压暂降所需

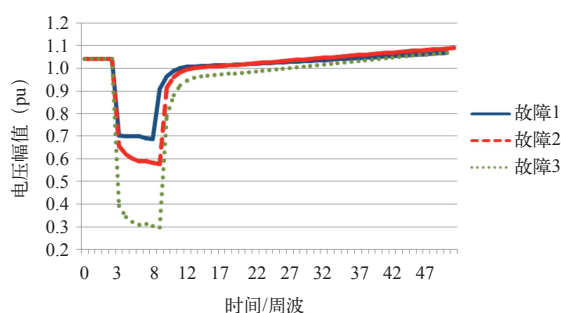


图4 电压暂降时10 kV母线电压示意图

的配置容量。

(1) 故障1

如表6所示, 仿真结果表明: 投入0.7 Mvar的D-STATCOM能保证这条10 kV配电线路的低压脱扣装置在遭遇79%的电压暂降时不会动作, 不会产生负荷切除的情况。

表6 发生故障1极端情况时的负荷切除情况

投入容量/Mvar	负荷切除情况
0	负荷1在第八个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar
0.1	负荷1在第八个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar
...	...
0.7	无

(2) 故障2

如表7所示, 仿真结果表明: 要保证该条线路上所有负荷的低压脱扣装置在遭遇87%的电压暂降时不动作, 需要投入3.3 Mvar的D-STATCOM。

表7 发生故障2极端情况时的负荷切除情况

投入容量/Mvar	负荷切除情况
0	负荷1在第六个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar; 负荷2、负荷3在第八个周波切除0.1 MW + j0.048 Mvar
0.1	负荷1在第六个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar; 负荷2、负荷3在第八个周波切除0.1 MW + j0.048 Mvar
...	...
0.3	负荷1在第六个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar
...	...
3.3	无

(3) 故障3

如表8所示, 仿真结果表明: 投入11.5 Mvar的D-STATCOM能保证该条线路上所有负荷的低压脱扣装置在遭遇92%的电压暂降时不动作。

表8 发生故障3极端情况时的负荷切除情况

投入容量/Mvar	负荷切除情况
0	负荷1~负荷6在第六个周波时共切除3 MW + j1.451 Mvar
0.1	负荷1~负荷6在第六个周波时共切除3 MW + j1.451 Mvar
...	...
6.0	负荷1~负荷3在第六个周波时共切除1.2 MW + j0.58 Mvar
...	...
10.5	负荷1在第六个周波切除0.3 MW + j0.145 Mvar
...	...
11.5	无

4. 配置容量优化分析

以上文仿真结果作为例子, 进行D-STATCOM的配置容量优化分析。

(1) 重整低压脱扣装置动作值前

根据现有的造价, 设定D-STATCOM的单价为50万元/Mvar (包括设备费用和安装人工费用), 一般情况下, 每年的运行维护费用为投资的10%, 即 $\alpha=0.1$ 。该公司在每次电压暂降造成停电后, 复电和重起生产线的过程大概需要4 h, 根据文献[10]的统计, 每次损失为13.6万元/MW, $l=13.6$ 万元/MW, 计算过程中不考虑每年因电压暂降而造成产出不合格品的经济损失 β , 代入式(5)可算得结果如表9所示。

表9 投资回收期一览表

故障序号	所需容量/Mvar	一年中电压暂降导致切负荷情况	投资回收期/年
故障1	0.7	3次切0.3 MW	4.0
故障2	3.3	2次切除1.2 MW, 7次切除0.3 MW	3.7
故障3	11.5	2次切除3 MW, 4次切除1.2 MW, 7次切除0.3 MW	4.9

D-STATCOM的使用寿命为25年, 大于以上三种情况的投资回收期, 所以以上三种情况的配置方式均具有经济性意义。

(2) 重整低压脱扣装置动作值后

根据供电部门人员反映: 多数用户采购低压脱扣装置之后, 并不了解其动作值和延时的整定方法, 所以大部分低压脱扣器的动作值与动作延时均为出厂设定值, 其合理性值得质疑。

下面, 假设负荷1的低压脱扣装置动作电压值重整为0.6 (pu)。忽略切除负荷对电压的抬升作

用, 结果统计(见表6~表8)可得合理整定动作值后所需投入的D-STATCOM容量, 再利用式(5)可算得其投资回收期, 结果如表10所示。

表10 重整后投资回收期一览表

故障序号	所需容量/Mvar	一年中电压暂降导致切负荷情况/MW	投资回收期/年
故障1	0	无	0
故障2	0.3	2次切1.2	0.5
故障3	10.5	2次切3, 4次切1.2	5.6

此外, 从表10可以看出: 当线路中的设备对电压不是太敏感时, 装设D-STATCOM的必要性就不是很大, 此时可考虑合理整定用户低压脱扣装置的动作值来抵御79%的电压暂降; 当线路中的设备对电压要求较高, 而无法将低压脱扣装置的动作值调小时, 则需要在10 kV母线处配置3.3 Mvar的D-STATCOM, 以确保能抵御87%的电压暂降。

结束语

本文通过采集10 kV线路负荷的低压脱扣装置信息和电压暂降历史数据, 通过仿真得到该条线路为抵御某类电压暂降所需的D-STATCOM配置容量, 再通过优化配置模型对D-STATCOM的配置做出优化决策。由仿真和经济性分析的结果来看, 并不能要求D-STATCOM能抑制掉所有的电压暂降, 这无论是在经济上或者在技术上都不现实。

结合用户低压脱扣装置的动作值整定情况, 建议设备对电压质量要求较低时可只通过合理整定低压脱扣装置的动作值来抵御电压暂降, 设备对电压质量要求高时适当配置一定容量的D-STATCOM, 以抵御大部分的电压暂降。

参考文献

- [1] Chapman D. Introduction to power quality [M/OL]. in Power Quality Application Guide—Copper Development Association, 2007. <http://www.cda.org.uk/pqp/pqag.htm>.
- [2] Tanti D K, Verma M K, Singh B, et al. Optimal

placement of custom power devices in power system network to mitigate voltage sag under faults [J]. International Journal of Power Electronics and Drive System, 2012, 2 (3): 267-276.

- [3] Zhang Yongjun, Chen Chao, Li Yong, et al. Dynamic voltage support planning for receiving end power systems based on evaluation of state separating and transferring risks [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80 (12): 1520-1527.
- [4] Nazarloo A, Sadeghi M, Hosseini S H, et al. Mitigation of voltage sags in a sample distribution system using Flexible D-STATCOM [J]. 2011 19th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2011 (5): 16, 17, 19.
- [5] Ooi B T, Kincic S, Wan X T, et al. Distributed static vars system (SVS) for regulated voltage support of load centers [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2003: 13-17.
- [6] 袁志昌, 刘文华, 宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法 [J]. 电力系统自动化, 2009 (14): 17-21.
- [7] 李剑辉, 曹阳, 辛拓, 等. 考虑电压暂降风险的高压配网动态无功容量优化配置 [J]. 电力系统保护与控制, 2014 (8).
- [8] Milanovic J V, Zhang Yan. Global minimization of financial losses due to voltage sags with FACTS based devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25 (1): 298, 306.
- [9] Farhoodnea M, Mohamed A, Shareef H, et al. Optimum D-STATCOM placement using firefly algorithm for power quality enhancement [C]. Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International, 2013: 98, 102.
- [10] Tollefson G, Billinton R, Wacker G, et al. A Canadian customer survey to assess power system reliability worth [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9 (1): 443, 450.

(收稿日期: 2014-05-07) **EA**