

[控制系统]

基于ETAP的光伏并网潮流影响及优化分析

文/国网山东省电力公司聊城供电公司 白 杨 孔 鹏
西华大学电气与电子信息学院 邱少引 方 勇
山东科技大学经济管理学院 王筱澜

随着光伏发电渗透率的增加，线路潮流和母线电压问题也越来越多，研究了光伏并网不同渗透率对母线电压和发电机出力等的影响。基于ETAP建立了某地区电网模型，应用ETAP软件对模型的潮流和优化潮流进行了仿真。潮流仿真结果显示，光伏接入点及附近母线电压随光伏发电出力的增加而增大；优化潮流仿真显示，接入点附近发电机出力和优化前后变压器分接头的变化量及整个电网损耗随着光伏发电出力的增加而减小。对于指导光伏发电接入电网的运行具有一定意义。

伴随矿物资源枯竭及环境恶化，人们开始不断地探索清洁和可再生能源，以风能、太阳能为代表的新能源得以快速发展。光伏并网容量增加，必定对原有电网的运行产生影响，围绕光伏并网的研究也逐渐展开。

目前，光伏并网研究主要集中于光伏发电的关键技术和并网影响研究。其中，光伏并网影响研究包括电能质量问题研究、孤岛效应问题研究、可靠性和稳定性问题研究、电网效益问题研究和配电网问题研究。

本文基于ETAP软件和某地区电网SCADA数据建立了大电网模型，并根据国家对大容量光伏并网系统的要求，选取一条110 kV母线作为并网节点，研究不同渗透率对该地区电网潮流的影响。潮流仿真结果显示，接入点及附近母线电压随光伏发电出力的增加而增大；优化潮流仿真显示，接入点附近发电机出力和优化前后变压器分接头的变化量及整个电网损耗随着光伏发电出力的增加而减小。

某地区电网ETAP模型建立

1. 拓扑分析

配电网拓扑分析是配电网潮流计算的基础，传

统的配电网拓扑分析是指利用配电电气设备的连接状态来确定整个电网拓扑的在线分析。本文借助在线拓扑分析中树搜索法的原理，根据实时的SCADA数据完成了配电网拓扑分析。

根据树搜索法原理（即将母线看作顶点，将支路看作图的边），本文以该地区唯一的500 kV变电站为基点，以110 kV变电站为边界节点，由高压等级向低电压等级辐射形成配电网的拓扑。拓扑分析的结果如表1所示。

表1 拓扑分析结果

名称		数量	
节点 /个	500 kV节点	1	90
	220 kV节点	46	
	110 kV节点	43	
支路 /条	架空线支路	73	113
	变压器支路	40	

2. 基于ETAP的某地区电网建模

建立电力系统仿真模型是ETAP仿真的基础。ETAP软件提供了电力系统仿真需要的各种元件，包括母线、变压器、架空线、等效负荷、等效电网及发电机等。每一个元件都可根据实际情况进行参数设置。

本文根据拓扑分析的结果以及某地区SCADA数据,建立了地区配电网ETAP模型。模型以500 kV母线(1号母线)为大电网接入点,如图1所示。发电机、变压器和线路均根据实际参数设置。模型中的负荷是等效负荷,由该节点本身的负荷及流向110 kV以下电压等级潮流组成。

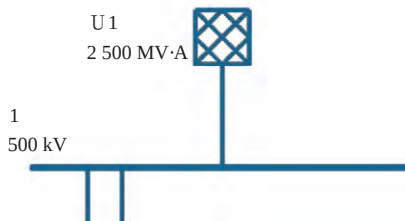


图1 大电网接入点

基于ETAP的光伏并网潮流分析

1. ETAP潮流分析建模

ETAP潮流分析模块有牛顿法、快速解耦法和加速高斯赛德尔法三种潮流计算的方法。根据所建立的大电网模型,本文采用牛顿法进行潮流分析。选取该地区的500 kV母线作为平衡节点,发电机控制方式设为电压控制方式,发电机母线作为PV节点,其余母线均作为PQ节点。

图2所示的是光伏并网点及其周边母线的拓扑结构。其中,2号母线和25号母线通过支路与电网中的其他节点相连。此外,区域中2号母线是PV节点,其余节点是PQ节点。选择的光伏接入点是64号节点。根据国家规定,通过110 kV接入电网的光伏发电站其并网点电压差应为相应系统标称电压的 $-3\% \sim +7\%$ 。本文通过直接在并网点接入无功补偿器的方式使并网点母线的电压保持在允许范围内。此外,ETAP提供的光伏模块有强大的光伏电池数据库,可根据实际情况调节太阳能光伏阵列输出的功率,同时对逆变器的控制方式、额定值等进行选择,如图3所示。

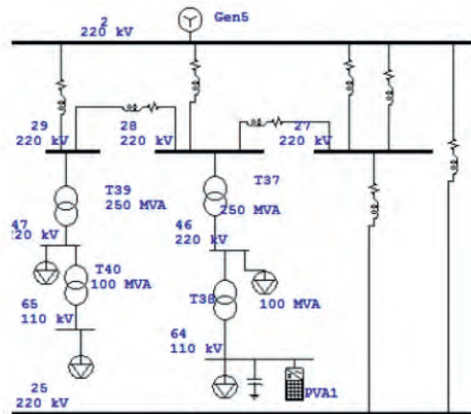


图2 研究区域拓扑

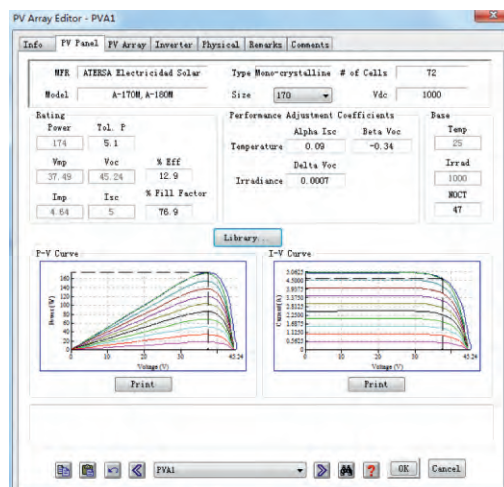


图3 光伏电池模块设置框图

2. 潮流结果分析

本文研究的是光伏并网渗透率对电网的影响,这里的渗透率指光伏发电量在并网点母线负荷容量中所占的比例。模拟光照给该地区电网光伏并网的渗透率带来的变化,分别取并网渗透率为0%、5%、10%、13%、15%。

首先进行无光伏并网的潮流分析。通过调节变压器分接头使各母线电压在规定的 $-10\% \sim +10\%$ 以内,最后得到的潮流结果如图4所示。

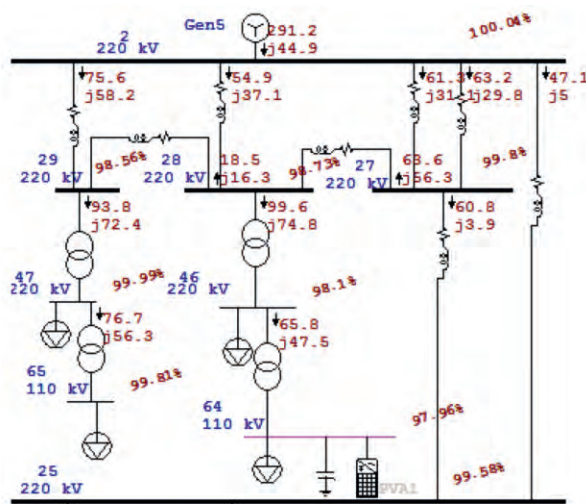


图4 无光伏并网的潮流结果

在进行光伏并网潮流分析时,变压器的分接头不做调整。表2给出了不同渗透率下该区域中各母线的电压。根据表中结果看出,光伏并网会引起附近母线电压的上升,但是没有超过允许的范围。同时,随着光伏并网容量的增加,各母线电压都呈现上升趋势,且接入点电压上升最明显。

表2 不同光伏发电渗透率下的母线电压

母线 /pu	0%	5%	10%	13%	15%
2	1.000 4	1.000 5	1.000 7	1.000 8	1.000 8
25	0.995 7	0.996 0	0.996 1	0.996 3	0.996 3
27	0.998 0	0.998 2	0.998 4	0.998 5	0.998 6
28	0.987 3	0.987 8	0.988 3	0.988 6	0.988 8
29	0.985 6	0.985 9	0.986 1	0.986 3	0.986 5
46	0.981 0	0.981 3	0.982 0	0.982 4	0.982 7
47	1.000 0	1.000 3	1.000 8	1.001 0	1.001 2
64	0.972 1	0.985 0	0.990 5	1.000 5	1.005 5
65	0.998 1	0.998 5	0.999 9	0.999 3	0.999 5

基于ETAP的光伏并网优化潮流分析

1. ETAP优化潮流分析建模

ETAP 的优化潮流模块 (OPF) 是一个非常强大的模拟软件。它在分析电力系统潮流的同时, 进行系统运行条件的优化, 自动调节各种控制设置, 并确保符合等式和不等式约束条件。系统优化可以降低安装和运行成本, 提高系统的整体性能, 增强系统的可靠性和安全性。

ETAP采用内点法进行优化潮流分析。本文的优化潮流分析的优化目标是整个电网的网损最小

$$S_{\text{lose_min}} = f(x, u) \tag{1}$$

流入各节点潮流的等式约束条件为

$$\sum P(x, u) = 0 \tag{2}$$

$$\sum Q(x, u) = 0 \tag{3}$$

不等式约束条件为

$$u_{\text{min}} \leq u \leq u_{\text{max}} \tag{4}$$

$$y(x, u)_{\text{min}} \leq y(x, u) \leq y(x, u)_{\text{max}} \tag{5}$$

式中, $S_{\text{lose_min}}$ 为线路损耗最小; x 是母线电压矢量, 称为静态变量参数; u 是系统控制矢量, 称为控制变量参数; P 为有功功率, 是 x 和 u 的函数; Q 为无功功率, 是 x 和 u 的函数; y 为系统输出矢量, 包括潮流等的典型变量参数, 它是 x 和 u 的函数。

根据ETAP优化潮流分析的特点, 在进行优化潮流分析时, 除了需要常规的潮流数据以外还需要优化潮流分析的特殊数据。本节沿用上节潮流分析中的数据, 取相同的区域为研究对象, 光伏并网方式也采用上一节的方式。此外, 设置母线的负荷调整系数为80%~125%, 发电机控制方式改为摆动控制, 有载调压变压器一次侧调节设置在-10%~+10%, 步长为1.375%, 不可处理选择退出计算, 计算精度设置为0.001, 最大迭代次数为50次。

2. 优化潮流结果分析

本部分首先进行无光伏并网的优化潮流仿

真, 图5所示的是无光伏并网的优化潮流分析结果。

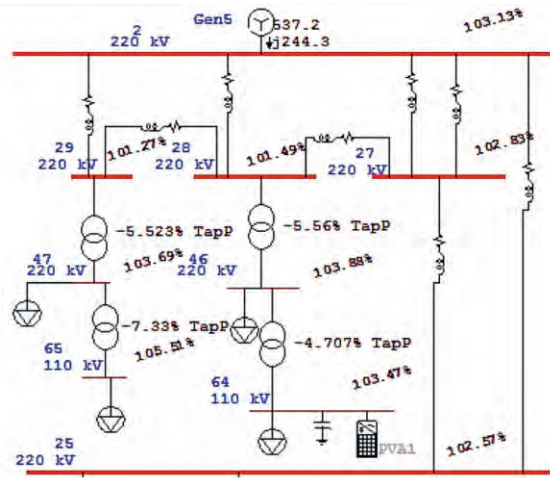


图5 无光伏并网的优化潮流结果

表3所示的是不同渗透率下电网网损的结果。从表中数据可以看出, 随光伏并网容量的增加, 整个电网的损耗呈下降趋势。这是因为光伏电源的接入使配电网的结构产生变化, 形成弱环状的结构, 减少了功率从源端传送到负荷的路程, 从而降低了网损。

表3 不同渗透率下网损结果

网损 (pu)	0%	5%	10%	13%	15%
P	0.112	0.110	0.103	0.100	0.109
Q	1.378	1.369	1.340	1.340	1.335

表4所示的是不同渗透率下各母线电压的优化结果。与表2相比可见, 为达到网损最低的目标, 优化后的母线电压都有所提升。随着光伏渗透率的增加, 电压并无太大变化, 表明优化后母线电压的稳定性增强。

表4 不同渗透率母线电压结果

母线 (pu)	0%	5%	10%	13%	15%
2	1.031 3	1.031 3	1.031 3	1.031 3	1.031 3
25	1.025 7	1.025 7	1.025 7	1.025 7	1.025 7
27	1.028 3	1.028 3	1.028 3	1.028 3	1.028 3
28	1.014 9	1.014 9	1.014 9	1.014 9	1.014 9
29	1.012 7	1.012 7	1.012 7	1.012 7	1.012 7
46	1.038 8	1.038 8	1.038 8	1.038 8	1.038 8
47	1.036 9	1.036 9	1.036 9	1.036 9	1.036 9
64	1.034 7	1.034 0	1.034 0	1.034 0	1.034 0
65	1.055 1	1.055 1	1.055 1	1.055 1	1.055 1

(下转第105页)

量，并且无线数据接收器开始接收数据；同时，打开在装置表面上设置的漏气信号发送模块开关，漏气信号发送模块中的气压传感器和应变片装置检测到开关柜气室中的初始时刻的气压值，并经过发送信号调理电路转变为电信号，进而被泄漏信号发送模块中的发送装置单片机储存，并将该初始时刻的气压值作为比较值。

当开关柜气室发生漏气时，此时其内部气压会发生变化，被气压传感器实时检测到，并被转变成电压的变化量信息；当开关柜气室结构变形严重时，安置在开关柜所设定位置上的应变片可弯曲的圆形塑料框架2变形，促使应变片1形变，其对应的电阻值发生变化，并被转换成电压的变化量信息，由此检测到该开关柜中的气压数据的变化值；当累积5次检测的开关柜气室部的气压值低于初始时刻的气压值时，说明开关柜发生漏气，此时，发送装置单片机立即驱动报警装置中的LED灯闪烁同时蜂鸣器鸣叫。

系统功能的实现

为验证本装置的有效性，现进行一次该装置的运行模拟。模拟试验采用上述连接方式，其中气压

传感器的型号为GY-63 MS5611，气体流量传感器的型号为F1012，无线数据发送器的型号为PT2262，无线数据接收器的型号为PT2272，发送装置单片机和接收装置单片机都选用常用的AT89C51单片机，电源模块电压为12 V。模拟试验结果表明：当开关柜气室发生漏气时，该装置能够立即触发泄漏信号的发送和接收模块并驱动报警模块，产生报警信息同时能够通过液晶显示屏显示装置的工作时间。其灵敏度较高，有效地实现了开关柜运行状态的在线监测。

结束语

针对传统气体绝缘开关柜漏气检测中存在测量精度及需人工维护的问题，本文所设计的气体绝缘开关柜漏气报警装置，能够对初期泄漏的气体信号进行有效的检测并及时地发出警报信号，提高了气体绝缘开关柜的运行可靠性，弥补了当前开关柜人工维护成本高及检测水平低的缺陷，有助于拓宽其应用范围。同时，该装置具有测试灵敏度高，能够实时监测开关柜运行状态的优点。EA

(收稿日期：2015.12.24)

(编辑：杨得润)

(上接第100页)

表5所示的是不同渗透率下各变压器分接头在优化潮流前后变化量的结果，表中结果以分接头变化量的绝对值表示。从表中数据可看出，光伏并网

只对并网点附近的几个变压器的分接头调节产生影响，对较远的变压器没有影响。并且，随着光伏并网容量的增大，优化前后分接头变化量在减小。

表5 不同渗透率下变压器分接头变化量

变压器 (pu)	0%	5%	10%	13%	15%
37	5.560	5.557	5.271	5.186	5.132
38	4.707	4.331	3.832	3.688	3.595
39	5.523	5.522	5.486	5.475	5.469
40	7.330	7.330	7.330	7.330	7.330

表6所示的是不同渗透率下各发电机的出力情况。从表中数据看出，随着光伏并网容量的增加，并网点附近发电机出力减小。

表6 不同渗透率下发电机出力结果

发电 (pu)	0%	5%	10%	13%	15%
1	0.867	0.867	0.867	0.867	0.867
2	0.140	0.140	0.140	0.140	0.140
3	0.077	0.077	0.077	0.077	0.077
4	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070
5	5.372	5.371	5.303	5.288	5.270
6	4.524	4.524	4.524	4.524	4.524
7	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007
8	3.007	3.007	3.007	3.007	3.007

结束语

大容量光伏电源的接入将对并网点和附近的母线产生影响，不同并网容量产生的影响不同。本

文利用ETAP软件，根据某地区实际电网数据搭建电网模型，并进行了不同渗透率的光伏并网潮流分析和优化潮流分析。仿真结果表明：ETAP能够方便有效地搭建电网模型，在光伏并网影响的研究中具有可行性和先进性；随着光伏并网渗透率的增大，接入点附近的母线电压上升显著，给电网带来不利，通过优化潮流可以减小并网渗透率对接入点附近母线电压的影响，提高电网运行的稳定性；随着光伏并网渗透率的增大，接入点附近的发电机出力、整个电网的网损以及优化前后变压器分接头的变化量减小，提高了电网运行的经济性。EA

(收稿日期：2016.01.06)

(编辑：杨得润)