

一种智能化低频低压减载调度模型的研究

朱仔新, 于晓军

(国网宁夏电力公司调度控制中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 针对传统低频低压减载装置在电压、频率控制上的缺点,如无法判断有功、无功的缺额量,以及动作的延时性等问题,利用最优潮流(Optimal Power Flow, OPF)模型,通过系统仿真,提出智能低频低压减载调度模型,并验证了其可行性。结果表明:智能化低频低压减载策略及其模型能够使电网损失降到最小,同时达到系统频率、电压稳定的要求,具有全局性、前瞻性、主动性、快速性的控制优点。

关键词: 低频低压减载; 最优潮流; 最优调度

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-3643(2015)01-0029-06

有效访问地址: <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2015.01.007>

Research on an intelligent low-frequency and low-voltage load shedding model

ZHU Zixin, YU Xiaojun

(Dispatching Control Center of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan Ningxia 750001, China)

Abstract: Aiming at the weaknesses of the voltage or frequency control in the traditional low frequency and low voltage load shedding equipment, such as unable to determine the shortfall of active power and reactive power, and the time delay of action, etc. Using the model of Optimal Power Flow (OPF), by system simulation, puts forward the dispatching model of the intelligent low frequency and low voltage load shedding, and verifies its feasibility. The result shows that the intelligent low frequency and low voltage load shedding strategy and its model can make power loss of power grid dropping to the minimum, achieve the demand of system frequency and voltage stability at the same time, and have the advantages like overall importance, prospectiveness, initiative and rapidity.

Key words: low-frequency and low-voltage load shedding; OPF; optimal scheduling

DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2015.01.007

根据电力系统的运行特性,系统中有功决定系统的频率运行水平,无功决定系统电压是否合格。系统运行频率和电压质量直接影响电力用户

正常用电及电力系统安全稳定运行。

电网安全运行的第三道防线保护装置中,低频低压减载装置使用最为广泛,也是目前电力系

收稿日期:2014-10-19

作者简介:朱仔新(1986),男,助理工程师,从事电力系统调度控制工作。

统控制电压、频率水平的主流手段,该装置通过对电流电压的采样进行计算,判断电压、频率是否达到装置动作值,决定是否切负荷。该做法简单,但是达不到系统优化运行的目的,而且切负荷装置每轮动作都有一定的延时,不利于系统稳态恢复。

于是设想在低频低压情况下,采用对潮流的重新分配以恢复在该低频或低压情况下的系统稳定的方法,使损失降到最小,保证重要用户的供电,避免造成供电企业巨大经济损失,同时达到系统频率、电压稳定的要求。

本文根据低频、低压产生的机理,通过最优潮流(OPF)计算模型模拟,提出了智能低频低压减载最优调度模型,并验证了正确性。

1 常规减载装置运行缺点

常规低频低压减载装置的主要功能是根据变电站内频率和电压的情况切除相应数量的负荷,使系统发、用电功率达到平衡,低频减载装置的减负荷总功率由系统最严重事故情况设置。由于系统运行方式灵活多变,且事故严重程度各不一样,对于可能发生的事故要求低频减载装置能做出恰当反应,切除相应数量的负荷功率,为达到该目的,低频低压减载装置采用分批断开负荷功率并带修正的方式进行切负荷。

其模型如下:

$$\Delta P_{Lk} = (1 - \sum_{k=1}^{i-1} \Delta P_{Lk}) \frac{K_{L*}(\Delta f_{i*} - \Delta f_h)}{1 - K_{L*} \Delta f_h} \quad (1)$$

式中: ΔP_{Lk} —各级需要切除的功率值,一般要求各轮切除功率小于该值。

在自动低频减载装置动作的过程中,当第*i*级启动切除负荷以后,如果系统频率仍未恢复正常并继续下降,则之后各轮会相继动作,直到频率恢复正常。其动作逻辑^[1]如图 1 所示。

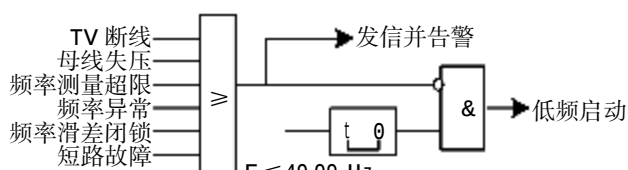


图 1 低频减载启动逻辑

常规的低频低压减载装置,无法判断有功、无功的缺额量,存在以下缺点:

(1)局部性:只考虑本站内的电压、频率水平,达到保护动作定值即按次序切除本站负荷,无法判断在电网哪个节点切负荷效果最佳。

(2)试探性:只根据定值逐轮进行切负荷,直到系统恢复到正常频率和电压为止。

(3)被动性:当系统出现低频低压情况后才能采取措施,而不能前瞻性地根据系统有功、无功平衡情况,提前进行预控。

(4)延时性:常规低频低压减载装置每一轮次动作都有相应地延时,一轮动作后经过延时才能动作下一轮,此种延时性对系统的稳定恢复十分不利。

2 智能低频低压减载模型

2.1 构建智能减载模型

为解决传统低频低压减载装置的缺点,必须打破传统的控制方法及逻辑,试图通过建立可以从全网出发,判断整个电网的功率平衡情况,决定是否需要切除负荷,并能解决从哪里切负荷最佳等问题的新型调度模型。为此本文提出了基于最优潮流模型^[2]的智能减载调度模型如下:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{ng} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) + \sum_{i=1}^{nd} w_{Pi} (P_{Di} - C_{Pi}) + \sum_{i=1}^{nd} w_{Qi} (Q_{Di} - C_{Qi}) \quad (2)$$

$$\sum_{k \in i} P_{Gk} - (P_{Di} - C_{Pi}) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$\sum_{k \in i} Q_{Gk} - (Q_{Di} - C_{Qi}) - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

$$P_{G \min} \leq P_{Gi} \leq P_{G \max} \quad (5)$$

$$Q_{G \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{G \max} \quad (6)$$

$$0 \leq C_{Pi} \leq P_{Di} \quad (7)$$

$$0 \leq C_{Qi} \leq Q_{Di} \quad (8)$$

$$U_{i \min} \leq U_i \leq U_{i \max} \quad (9)$$

$$P_{i \min} \leq P_{ij} \leq P_{i \max} \quad (10)$$

式中: a_i , b_i 和 c_i —分别为发电机运行费用函数的

二次项系数,一次项系数和常数项,均为常数;

P_{Di} —故障前 i 节点 (节点为变电站或发电厂) 的有功负荷值;

C_{Pi} —故障后 i 节点的实际有功负荷值;

Q_{Di} —故障前 i 节点的无功负荷值;

C_{Qi} —故障后 i 节点的实际无功负荷值,故障后系统的实际负荷应该小于或等于故障前的负荷状态。所以有: $P_{Di} - C_{Pi} = i$ 节点需要切除负荷量。

式(3)、(4)为节点功率平衡方程式约束条件;式(5)、(6)为发电机有功出力约束和无功出力约束条件;式(7)、(8)为系统实际的有功和无功负荷约束条件;式(9)为节点电压约束条件;式(10)为输电线路输电容量约束条件。

其中最优化潮流采用发电机运行费用与甩负荷罚函数之和最小为目标函数。当系统容量裕度大时,即使有线路发生故障,电网调度人员通过重新调整发电机出力,增减变电站无功补偿等措施,可以使系统重新进入平衡态,避免系统甩负荷。当系统发生必须切负荷的严重故障时,该模型通过优化潮流计算,在满足系统运行条件下,使系统切的负荷最少。该算法首先会选择负荷罚函数系数最小(相对次要的负荷)将其切除,最大程度保障重要用户供电。该模型将供电可靠性指标(保证重要用户供电可靠)转化成经济性指标(供电中断会给电网公司造成经济损失)来模拟。该模型的目标函数包括两部分:

$$\sum_{i=1}^{ng} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (\text{发电机运行费用})$$

$$\sum_{i=1}^{nd} w_{Pi} (P_{Di} - C_{Pi}) + \sum_{i=1}^{nd} w_{Qi} (Q_{Di} - C_{Qi})$$

(甩负荷所产生的费用)

可以简单认为发电机运行费用为电网公司从发电厂购买电能产生的费用(包括运行,维护,检修等费用在内)。由于重要用户停电,电网公司需要赔偿用户损失,所以甩负荷所产生的费用可以认为是电网公司需要赔偿给用户的停电损失费用。

其中 w_i 为各个负荷接点的甩负荷费用系数,对于重要负荷(如政府、军事、铁路等供电负荷),

该系数很大,不重要负荷该系数很小。在电网发生事故需要切除负荷时,可以优先将不重要的负荷切掉,保证重要用户的可靠供电。

2.2 确定减载模型工作逻辑

新模型应能满足在各种情况下电网实际运行的需要,即在系统正常情况下可以根据智能减载模型进行智能化调度。而目标函数为发电机运行费用和甩负荷费用之和最小,在没有甩负荷费用的情况下,能保证发电机运行费用达到最小,这样电网公司将会获得最大收益。该模型可以根据调度的需求,在线实时计算,也可以在故障情况下,启动该模型进行故障情况下的甩负荷计算,计算出在哪个变电站切负荷,切多少负荷量,最终保证电网公司损失降到最低。其实现方式如下:

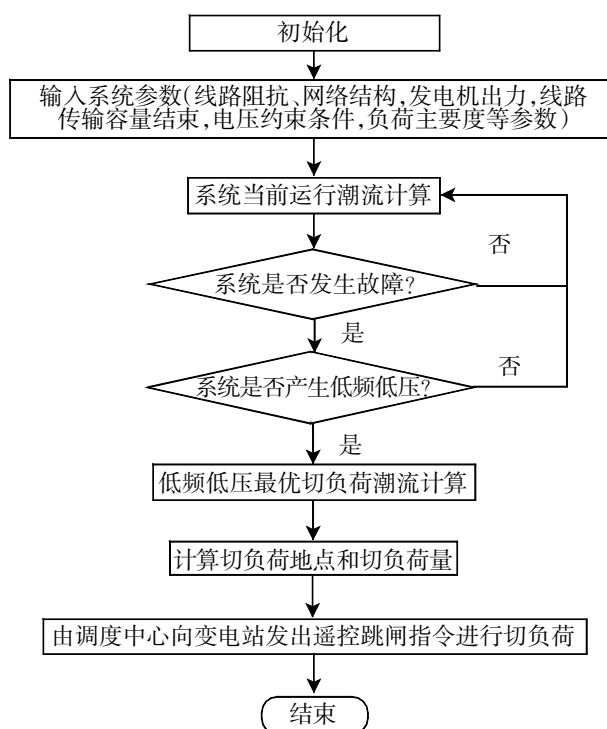


图2 低频低压最优切负荷的调度模型流程

在流程中线路阻抗,发电机出力约束,线路传输容量约束和各变电站的电压约束条件都是调度系统已经保存的数据,只有网络结构是变化量,调控中心可以通过变电站综合自动化系统实时掌握系统网络结构。当发生事故造成网络结构发生变化时,通过对新网络结构进行潮流计算,即可知道是否需要切负荷,保证了模型在各种运行情况下

的正确工作。

3 智能减载模型仿真实证

3.1 选取算例及仿真程序

有了模型算法及工作逻辑后,下面进行模拟仿真,验证模型算法的正确性及可行性。本文采用 IEEE 30 节点算例,通过 MATLAB 软件编程进行系统仿真,其节点系统如图 3 所示。

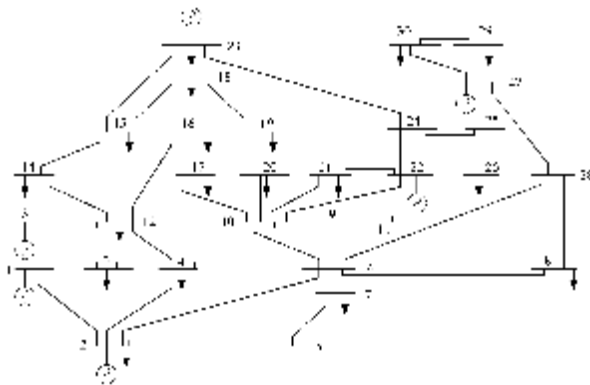


图 3 IEEE 30 节点系统

本模型通过随机断开输电线路,或者切除发电机来模拟系统发生故障,造成低频、低压的系统运行状态。但这样模拟就可能出现某条联络线断开后,与该联络线有关支路已断开,在形成节点导纳矩阵时,与该支路有关的矩阵元素为 0,形成的雅阁比矩阵可能不存在逆矩阵,造成方程无解。为解决这一问题,本算例采用增加联络线阻抗^[3]的办法。如式(11)所示:

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin \theta_{ij} \tag{11}$$

线路上传输的功率在电压和相位差一定的情况

况下,与线路阻抗成反比,当阻抗值很大时,线路上的有功很小,在工程中是可以忽略的,以此避免潮流无解的情况。接于母线节点上的发电机,由于其出口到母线之间距离很短,认为阻抗为零,不参加潮流计算,本算例通过修改发电机出力上限来模拟发电机故障,即通过将发电机出力上限修改为 0 模拟,因此最优潮流计算模型不变。对该最优潮流模型,本算例采用目前计算速度很快的原对偶内点优化算法,其计算时间很短,可以满足在线计算。

3.2 仿真结果分析

本算例选取了两种故障情况下模型运行情况进行分析:

- (1) 系统发生故障通过模型计算后进行潮流重新调度,无需切负荷的状态,频率满足要求;
- (2) 系统发生故障产生有功缺额,此时模拟系统低频低压运行状态,该状态需要切负荷。

故障 1:模拟变电站 2 和变电站 6 之间的线路发生故障跳闸。

如表 1 所示,当变电站 2 和变电站 6 之间的线路发生故障跳开后,其传输功率为 0.004 79 MW,这里以增加变电站 2 和变电站 6 之间联络线的线路阻抗来模拟线路跳闸,造成结果不为零,但此值可近似为零。由模拟数据可以看出,该模型通过对潮流的重新分配,恢复了系统的有功、无功平衡,由变电站 2 和变电站 6 之间线路传输的功率转移到其它线路上进行传输,尤其是靠近该联络线的线路潮流变化较大,如表 1 所示联络线 3-4、2-5、4-6、5-7 等。由于该网络结构较复杂,在此种模拟状态下,系统未出现功率缺乏现象。

表 1 变电站 2-6 线路故障但无切负荷量时线路传输功率情况

首节点	末节点	故障后有功传输功率/MW	故障前有功传输功率/MW	线路约束上限/MW	首节点	末节点	故障后有功传输功率/MW	故障前有功传输功率/MW	线路约束上限/MW
1	2	-15.781 3	-21.574 9	78	6	7	-2.854 13	-8.532 81	78
1	3	-25.486 2	-19.506 5	78	6	8	-23.999 9	-24	24
2	4	-28.414 2	-18.213 2	39	6	9	-7.589 91	-8.258 22	39
3	4	-22.774 5	-16.923 3	78	6	10	-4.337 09	-4.718 98	19.2
2	5	-20.401 5	-14.531 7	78	9	11	0	0	39
2	6	-0.0047 9	-21.893 3	39	9	10	-7.589 91	-8.258 22	39
4	6	-35.191 2	-20.312 5	54	4	12	-7.856 1	-6.986 61	39
5	7	-20.182 2	-14.416 6	42	12	13	24.885 7	24.670 43	39

故障 2:模拟节点 2 的发电机故障跳闸。如表 2 所示,当节点 2 的发电机由于某种原因停运后,其出力变为零,此时系统出现的有功缺额量如表 3 所示,故障后线路的传输功率情况如表 4 所示。

从表 3 中仿真结果可以看出,第二次严重故障产生了 30.03 MW 的功率缺额,如此多的功率缺额已无法通过调整潮流方法恢复功率平衡,只能切除部分负荷以维持系统正常运行,该模型通过计算判断从相对不重要的变电站节点 4、12、19、29 切除负荷。从结果看,该模型能将负荷一次性控制

到位,将系统功率迅速拉回至平衡状态,解决了传统低频低压减载装置的“延时性”、“试探性”控制问题。同时能够从全网出发,在系统出现低频、低压运行状态之前,完成系统有功、无功缺额量计算并采取控制措施,解决了“局部性”、“被动性”控制问题。

从表 4 仿真数据可以看出,第二次故障后,潮流分布发生了大面积转移,重新形成新的平衡状态,该状态虽然造成部分非重要负荷切除,但是保证了重要用户的供电可靠性及系统稳定,通过表 3、表 4 可以看出该模型能够正确判断系统运行情

表 2 节点 2 发电机再次故障后发电机出力情况

发电机节点	发电机有功出力费用二次系数	发电机有功出力费用一次系数	故障后发电机有功出力/MW	故障前发电机有功出力/MW	故障后发电机无功出力/Mvar	故障前发电机无功出力/Mvar	无功出力上限/Mvar	有功出力上限/MW
1	0.02	2	56	41.076	26.812	-7.002 5	105	56
2	0.017 5	1.75	0	54.866	0	41.993 91	42	56
22	0.062 5	1	18.542	22.732	43.749	43.749 28	43.7	35
27	0.083 4	3.25	38.5	29.593	-12.21	-13.655 8	34.09	38.5
23	0.025	3	21	19.221	14.821	10.074 65	28	21
13	0.025	3	28	24.670	28.375	25.054 22	31.29	28

表 3 系统发生第二次故障后负荷情况

负荷节点	故障后负荷有功/MW	故障前负荷有功/MW	故障后负荷无功/Mvar	故障前负荷无功/Mvar	有功负荷系数	无功负荷系数	有功负荷切除量/MW	无功负荷切除量/Mvar
2	21.7	21.7	12.7	12.7	3 000	1 500	0	0
3	2.4	2.4	1.2	1.2	5 000	2 500	0	0
4	0	7.6	1.599 999	1.6	1 000	500	7.6	0
7	22.8	22.8	10.9	10.9	2 000	1 000	0	0
8	30	30	30	30	8 000	300	0	0
10	5.8	5.8	2	2	5 000	3 000	0	0
12	0.663 92	11.2	7.499 999	7.5	1 000	800	10.53	0
14	6.199 99	6.2	1.599 999	1.6	1 500	700	0	0
15	8.199 99	8.2	2.5	2.5	1 300	900	0	0
16	3.5	3.5	1.799 999	1.8	4 000	700	0	0
17	9	9	5.8	5.8	7 000	3 000	0	0
18	3.2	3.2	0.9	0.9	6 000	1 000	0	0
19	0	9.5	0	3.4	500	100	9.5	3.4
20	2.2	2.2	0.7	0.7	3 000	1 000	0	0
21	17.499 9	17.5	11.2	11.2	2 000	1 500	0	0
23	3.2	3.2	1.6	1.6	1 400	950	0	0
24	8.7	8.7	6.7	6.7	1 900	850	0	0
26	3.5	3.5	2.3	2.3	7 000	4 700	0	0
29	0	2.4	0.9	0.9	800	570	2.4	0
30	10.6	10.6	1.9	1.9	5 000	2 900	0	0

表 4 系统发生第二次故障后线路功率传输情况

首节点	末节点	故障后有功传输功率/MW	故障前有功传输功率/MW	线路约束上限/MW	首节点	末节点	故障后有功传输功率/MW	故障前有功传输功率/MW	线路约束上限/MW
1	2	-39.993 9	-15.781 3	78	6	7	-12.451 6	-2.854 13	78
1	3	-16.006 1	-25.486 2	78	6	8	-22.179 4	-23.999 9	24
2	4	-7.387 35	-28.414 2	39	6	9	-1.540 44	-7.589 91	39
3	4	-13.444	-22.774 5	78	6	10	-0.880 25	-4.337 09	19.2
2	5	-10.544 8	-20.401 5	78	9	11	0	0	39
2	6	-0.002 52	-0.004 79	39	9	10	-1.540 44	-7.589 91	39
4	6	-26.176 3	-35.191 2	54	4	12	5.413 213	-7.856 1	39
5	7	-10.476 2	-20.182 2	42	12	13	28	24.885 7	39

况,迅速做出正确调度决策,避免了事故扩大,为电网安全稳定运行提供了有力保障。

4 效果评价

该调度模型具备了判断从哪座变电站切负荷效果最佳的“全局性”控制优点,提前判断系统有功、无功缺额量的“前瞻性”控制优点,根据系统有功、无功平衡情况,在产生频率、电压下降之前进行预控的“主动性”控制优点,一次性将有功、无功调整平衡的“快速性”控制优点。同时通过仿真,该模型可以应对电网实际运行中的各类故障情况,并做出快速、正确的判断,达到了预期目的。

该智能减载模型在实际应用中还需加入电网断面控制极限等系统稳定约束条件,以保证电网调度的各项实际应用要求。

5 结论

(1)本文根据低频、低压产生的机理,通过最优潮流(OPF)计算模型模拟,提出了新型智能低频低压减载最优调度模型,通过合理的工作

逻辑,选取节点算例及仿真程序,验证了模型的正确性及可行性。

(2)本文模拟的两次典型故障中,该模型都能够从全网出发做出正确的调度决策,即通过调整发电出力、切负荷等手段,保证电压、频率恢复正常,完成了维持电力系统稳定运行的任务。

(3)智能减载模型突破了传统低频低压减载装置的“局部性”、“试探性”、“被动性”、“延时性”运行缺点,具备了明显的“全局性”、“前瞻性”、“主动性”、“快速性”控制优点。

(4)该智能减载模型目前处于仿真实验阶段,随着智能电网的发展,该模型可以广泛应用于电网的智能调度,在优化调度运行方面具有很高的实际应用价值。

参考文献:

[1] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(下册)[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
[2] 丁晓莺,王锡钊.最优潮流在电力市场环境下的最新发展[J].电力系统自动化,2002,26(13):1~8.
[3] 林生宏,刘明波.含 FACTS 元件的电力系统非线性最优潮流计算[J].电力系统自动化,2000,10(25):27-32.

什么是应用研究

应用研究是把基础研究发现的新知识、新理论用于特定目标的研究,产生新方法、新方案和建立新标准等。它是基础研究与开发研究之间的桥

梁。基础研究获取的知识必须经过应用研究才能发展为实际运用的形式。