

考虑暂态性能的电网低频低压协调减载策略

随着特高压的大力发展,电力系统的规模和网络结构越来越复杂,电网发生扰动的概率和复杂程度也随之增大,而频率和电压作为两个衡量电网稳定的重要质量指标对于减载的意义十分重大。归纳了目前常用减载策略的优缺点,此外还考虑了电网频率在低频低压减载恢复过程中的暂态稳定性,期间引入了广域测量系统(WAMS),通过PMU使获取的频率等电气信息量更加实时和准确,也促进了电力系统低频低压的协调控制。

王 磊 贾燕冰/太原理工大学电气与动力工程学院



王 磊/硕士研究生

近年来,随着电力系统的跨越式发展,国内外大停电事故表现出很多的不稳定情况,主要为频率、电压和功角的不稳定^[1-3],其中不少扰动的出现同时伴随着电压现象和频率现象。虽然目前国内对于低频低压减载的策略研究已经相对成熟,但是二者都还是针对各自的单一状况进行的,缺乏协调^[4]。然而,当前针对整定参数值和动作值的低压低频减载主要侧重于系统的稳定性,即系统的静态特性或是中长期动态的相对稳定,而不是暂态安全性能的研究。文献[5]用数学概念描述了电网减载量的优化问题,将UVLS和UFLS作为多级控制序列,根据系统电压的安全裕度、暂态频率的安全性指标来计算减载策略的性价比,逐级去实现全局优化。文献[6]指出,扰动导致的电压失稳是由有功功率不平衡或者无功功率补偿不足引起的。文献[7]指出,电力系统中暂态电压和频率的偏移程度十分重要,甚至比电压、频率和功角的稳定性还要重要。本文在电力系统低频减载过程中考虑了电压,同时也加入了对暂态稳定性的评估,让

最终得出的减载策略更加可靠和准确,并通过实例仿真验证了电力系统时域暂态结果的可行性和合理性。

电网的低频减载研究实况

目前电网的低频减载根据适用性区别分为三类:传统法、半适应法和自适应法^[8-10]。

传统法又称“逐次逼近”法,它不需要复杂的继电器,目前适用性广泛,主要依据系统的离线仿真并结合专家经验和操作方法对系统进行离线整定。传统法根据一般故障最大程度地进行整定,忽视了系统实际的运行情况,从而有效抑制了频率的下降;只是有时会造成系统不必要的欠切或过切。

半适应法是在传统法的基础上,在首轮由频率的变化率得到系统的功率缺额,从而设计裁剪量。其特点是在低频减载的第一步测量当前的频率变化率,从而改进了低频减载首轮的切负荷量,一般也设有加速轮。在比较大的扰动下监测到严重的功率缺额时直接采取切负荷措施。但是实际中,在突发状况下半适应法所体现出来的优势跟传统法比起来并不明显。

自适应法是根据电力系统频率响应模型和频率微分模型而建立的方法。在简化的系统模型下,由 $\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=0} = \frac{P_{\text{step}}}{2H}$ 可知,系统功率缺额可以根据频率变化率的初值获取。它作为电力系统减载起动信号,根据其变化在线决定切负荷量,从而改善系统的减载性能。自适应法从实

关键词/Keywords

电力系统 ·
低频低压减载 ·
WAMS ·
PMU ·
暂态稳定性 ·

时的角度更加准确地确定切负荷量。但是它的难处在于频率变化率整定值的设定,并且对设备测量结果的要求比较高。

协调减载的数学模型

1. 变量定义

本文定义系统内每个负荷的每一级可切负荷量为一个0、1控制变量。如果系统中有 n 个负荷,将其按重要性划分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。对于第 l 类中第 i 个负荷点的第 k 级切除策略定义为 $u_{lik} \in (0, 1)$,其中 $i=1, 2, \dots, n_l$ (n_l 为第 l 类负荷中可切负荷的数量, $n_1 + n_2 + n_3 = n$); $k=1, 2, \dots, j_{li}$ 。

2. 约束条件

(1) 控制目标约束

电网低频低压减载中的总控制目标是切负荷量尽量小,本文是在满足所要求的约束条件下使其减载量达到最小。控制目标约束表达式为

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{j_{li}} u_{lik} P_{L-lik} \quad (1)$$

式中, P_{L-lik} 是第 l 类中第 i 个负荷点的第 k 级切负荷策略对应的切负荷量。

(2) 控制策略约束

在电力系统中,负荷按重要性可划分为三类:一级负荷、二级负荷和三级负荷。在切负荷的选择上优先选择切除三级负荷,二级负荷次之,一级负荷最后考虑。约束实质为按级别分轮次动作。

$$\bar{u}_{1ik} \bar{u}_{2ik} + u_{2ik} u_{3ik} = 1 \quad (2)$$

考虑到实际情况,在确定的切负荷策略中,每一个可切负荷的所切负荷量都是唯一的,因此定义每个切除级别最多只能执行一级,表现的约束条件为

$$\sum_{k=1}^{j_{li}} \left[\prod_{S=k}^{j_{li}} \bar{u}_{lik} \right] = 1 \quad (3)$$

3. 状态约束建模

(1) 等式约束

电网运行中的一个基本要求就是功率守恒,即发电机组发出的功率和电网消耗的功率相等。在有 m 台发电机以及 n 个负荷的电力系统中,功率

平衡约束为

$$\sum_{r=1}^m P_{Gr} = \sum_{i=1}^n P_{Li} + P_{\text{loss}} + \Delta P_{\Delta} \quad (4)$$

式中, P_{Gr} 为第 r 台发电机输出的有功功率; P_{Li} 为第 i 个负荷吸收的有功功率; P_{loss} 为系统有功损耗,系统较小时可忽略不计; ΔP_{Δ} 为有功偏差值。

另外, $P_{Li} = P_{Li0} - \sum_{k=1}^{j_{li}} u_{lik} P_{L-lik}$, P_{Li0} 为故障前第 i 个负荷吸收的有功功率初值。

电力系统运行中另一个重要的条件是潮流等式约束,表达式为

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} + V_i \sum_{j=1}^N V_j (B_{ij} \cos \theta_{ij} - G_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6)$$

(2) 不等式约束

电网在一定的扰动下会使有功功率失衡,从而导致频率下降。为了防止系统频率崩溃,因而对频率变化加以约束,即

$$\Delta f_{\min} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\max} \quad (7)$$

在忽略系统暂态变化情况下,有功功率变化量 ΔP_f 与频率变化量 Δf 满足的关系式为

$$\Delta P_f = a \Delta f + b$$

式中,系数 a 、 b 均由系统参数决定。

将该系统的频率变化范围约束转化为系统的有功偏差范围约束,表达式为

$$a \Delta f_{\min} + b \leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{j_{li}} u_{lik} P_{L-lik} \leq a \Delta f_{\max} + b \quad (8)$$

电力系统在大的扰动下不仅会导致有功功率缺失,也会使无功功率失衡,从而造成电压波动。通常情况下将几个关键母线节点电压作为衡量电压的稳定性指标,并且对所监测的电压变化范围进行约束,即

$$\Delta V_{\min} \leq \Delta V \leq \Delta V_{\max} \quad (9)$$

在电力系统暂态稳定的前提下,对电压稳定判据用如下静态指标表示为

$$\Delta V = C \Delta P + D \Delta Q \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{P\theta} & J_{PU} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{pmatrix}^{-1} = J^{-1} \quad (11)$$

式中, J 为系统潮流雅可比矩阵; ΔP 为系统的有功不平衡量; ΔQ 为无功不平衡量。

如此, 所测关键节点的电压范围约束就可以转化为系统的有功和无功偏差范围约束, 进而与减载措施联系起来。

综上所述, 本文的适用性问题可描述为

$$\exists U_i \in S \rightarrow C_1 \cap C_{2-1} \cap C_{2-2} \cap C_{3-4} \cap C_{3-5} \cap C_{3-6} = 1 \quad (12)$$

式中, S 为决策空间; U_i 为其空间内由一系列0、1变量构成的控制变量; C_1 为控制目标约束; C_{2-1} 、 C_{2-2} 为控制策略约束; C_{3-4} 为频率变化范围约束; C_{3-5} 为有功偏差范围约束; C_{3-6} 为电压变化范围约束。

4. 考虑暂态稳定性因素

在电网低频低压减载过程中系统的暂态性能(如过冲特性、稳定时间等), 在自动控制理论中可以通过其轨迹偏移程度来定量评估。因此, 本文将这一思想用于评价系统减载过程中的暂态稳定性。

近年来, 随着广域动态测量系统(WAMS)的迅速发展, 以GPS技术为基础完成系统状态的实时监控, 从而为紧急切负荷策略提供了很好的设计思路。在此基础上, 通过现代化通信网络和计算机技术实现了对联网数据的同步采集、实时记录与分析以及远距离实时传递与处理, 尽可能做到对电网动态的全局监控。

通过对WAMS结构单元PMU的合理配置, 利用其实时和同步的特点能获取更加准确的频率、电压等电气数据, 然后利用频率变化偏移指标 F_{ATV} 来评估频率在切负荷频率恢复过程中的偏移程度, 表达式为

$$F_{ATV} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \int_{t_1}^{t_{sim}} |\Delta f(t)| dt \quad (13)$$

式中, t_1 为轨迹曲线的起始积分时间; t_{sim} 为仿真结束时间; M 为频率观测点数目。

在暂态过程中不同区域内点的频率有所偏差, 式(13)采取取均值的办法, 重点监测系统 M 个负荷点, 其中 $m=1, 2, \dots, M$, 为第 m 个频率观测点。一般而言, 对于减载过程的过调现象, t_1 取切负荷首轮动作后频率第一次回到50 Hz时对应的时刻; 对于减载过程中的欠调现象, t_1 取首轮动

作后频率第一次回到49 Hz时对应的时刻。

频率变化偏移指标 F_{ATV} 是频率偏差曲线在时间的积分, 其函数值越小, 表示频率在减载后的恢复过程中的偏移越小, 系统也越稳定。反之, 如果其值越大, 说明系统过冲严重。

本文先考虑电压的低频低压协调减载策略, 利用遗传算法得出一定数量的可行性策略, 然后利用 F_{ATV} 值评估频率在减载恢复过程中的偏移程度并进一步筛选, 最终确定相应的暂态性能更加稳定、切负荷量更少的低频低压减载策略。

求解策略

1. 遗传算法的应用

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种全局优化算法, 由生物进化理论启发得出。与传统方法相比, 遗传算法有更显著的特点: ①群体搜索性; ②可扩展性, 易于结合别的技术; ③搜索具有随机性, 不易陷入局部最优点; ④不需要辅助信息。目前遗传算法在很多领域获得了广泛的应用, 并且取得了明显的成绩, 成为解决各类相关问题的有力工具。

在电网的低频低压减载问题中, 目标函数应有如下要求: 在考虑暂态安全性能的前提下, 减负荷量最小; 当电磁功率小于负荷功率时, 应该有选择地采取切负荷策略, 比如考虑上文中所提的各类约束。

综上所述, 得出优化问题目标函数

$$F = f(x_i) \quad x_i \in G \quad i \text{ 为自然数} \quad (14)$$

式中, x_i 为自变量; G 为 x_i 的定义域, 即优化问题 F 的解空间。优化问题的关键是识别一组 x_i , 使 $F = f(x_i) \rightarrow \min$ or $\max$, 即问题的最优解。

搜索与优化是GA的主要应用场合, 其特点是可以避免局部优化从而找到全局最优解。其算法程序流程如图1所示。

2. 搜索和校验部分求解

根据系统的负荷点个数, 结合控制目标约束先进行种群初始化, 用二进制编码形成由一系列0、1变量构成的字符串, 即初始化种群。然后按照潮流约束方程式(5)和式(6)求出减载过程

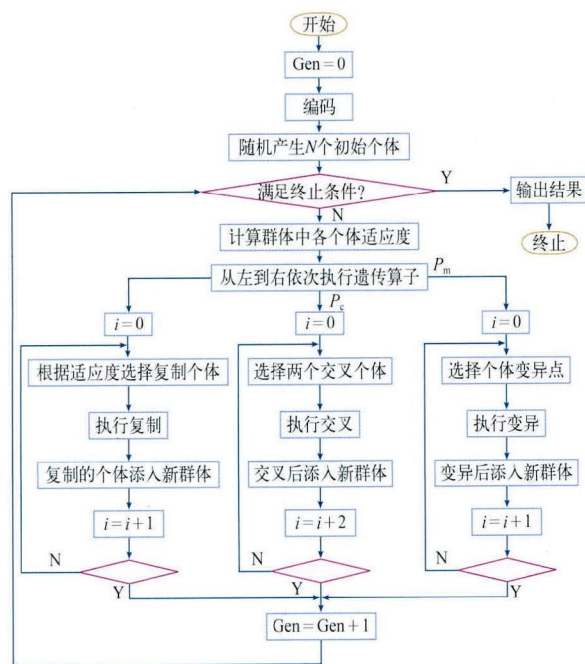


图1 遗传算法流程

中有功和无功的不平衡量 ΔP 和 ΔQ ，带入电压稳定判定的静态指标式(10)中校验 ΔV ，直到使其满足电压约束条件。在整个搜索流程中，根据约束条件式(1)、式(2)、式(3)、式(7)和式(8)，通过遗传算法特有的搜索机理全局性地搜索得出缩小的策略空间，本文遗传算法迭代参数如表1所示。在实际操作中，对约束条件的搜索和校验的划分也比较灵活，只会影响搜索时间的差异，并不会导致结果的不同。

表1 遗传算法迭代参数

GA参数	数值
种群大小	100
遗传代数	50
交叉率	0.85
变异率	0.01
最优个体保留代数	20

3. 暂态安全评估

为了保证所求解有一个很好的暂态稳定性，先利用遗传算法得出一定数量的可行性策略，然后再利用频率在减载恢复过程中的偏移程度指标 F_{ATV} 来进一步筛选得出更加合理和准确的解。由于时域暂态仿真的模拟适应性较强，可以相对准确地模拟系统在扰动发生后的动态变化过程，本文

采取时域暂态仿真来验证系统在通过低频低压减载策略实行切负荷后的暂态稳定性。

仿真算例

以10机39节点系统为例进行仿真验证,如图2所示。当 $t=1$ s时,系统39节点发生三相短路故障。该故障持续时间为0.5 s,紧接着发电机功角失稳,导致系统的频率、电压开始波动。图3为单独采取低频减载策略(传统法)后系统的状态,具体策略是节点7切除负荷的30%,节点14切除负荷的50%,判据为系统频率低于0.98(pu)。

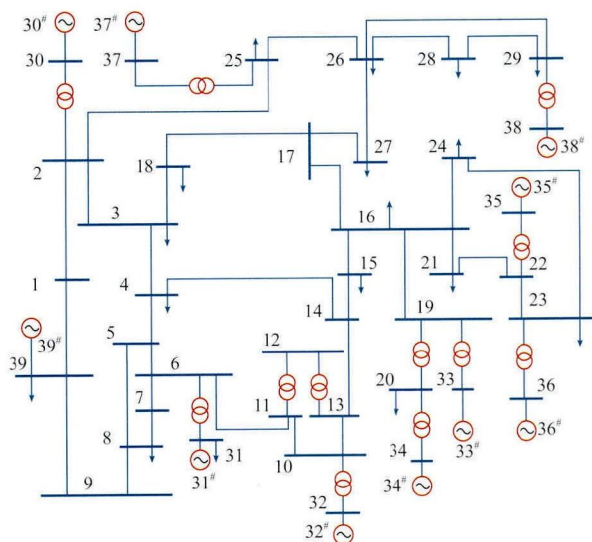


图2 10机39节点系统

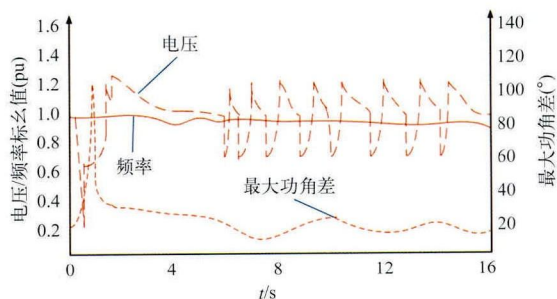


图3 传统低频减载策略下的系统状态

由图3可以看出,单独采取传统的低频减载措施后,系统的频率和功角有显著的恢复,但是电压的波动依旧存在。下面仍用同样的系统故障,采用低频低压协调减载策略来进行切负荷。表2为通过遗传算法获取的最后一代种群的部分可行解,对相对最优的5组解进行评价。任取策略 U_1 ,即对

系统的节点1处负荷进行二级切除,对节点3处负荷进行二级切除,减载后系统的状态如图4所示。

表2 低频低压协调减载策略可行解

策略号	变量取值
U_1	$u_{12}=u_{32}=1$, 其余为0
U_2	$u_{23}=1$, 其余为0
U_3	$u_{22}=1$, 其余为0
U_4	$u_{11}=u_{32}=1$, 其余为0
U_5	$u_{51}=u_{23}=1$, 其余为0

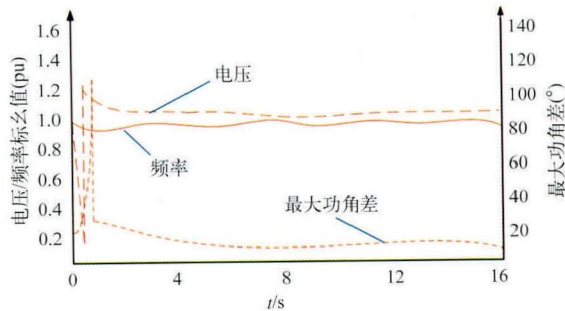


图4 低频低压协调减载策略下的系统状态

如果考虑系统频率的暂态稳定性,对最后一代种群进行逐步筛选,获取了在频率和电压恢复效果相对稳定的前提下暂态稳定性更好的一组最优解,如图5所示。可以明显看出,图5比图4中频率的暂态稳定性更好,切负荷策略效果更加显著。

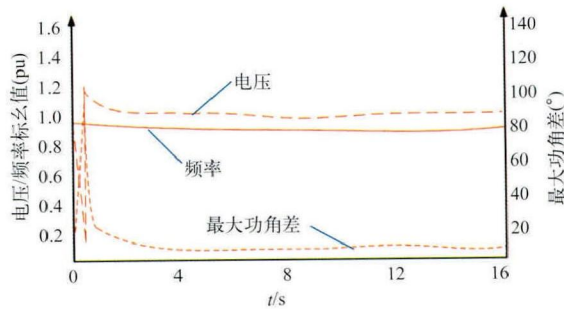


图5 考虑暂态稳定性的减载策略下的系统状态

结束语

低频减载与低压减载是电力系统“三道防线”中极为关键的一环。可有效防止系统由于大扰动而对整个电网运行造成严重影响。本文不仅考虑了电压和频率协调减载问题,而且通过利用WAMS对频率的实时性和准确性进行了测量,评估了频率在减载恢复过程中的偏移程度,使协调减载策略更加合理,为电网的紧急切负荷控制策

略提供了一个新的思路。

参考文献

[1] 王伟红,黄民翔,刘菲,等.影响电网频率动态过程的因素分析[J].能源工程,2006(5):9-13.

[2] 陈俊山,洪兰秀,郑志远.电力系统低频减载研究与应用发展[J].继电器,2007,35(14):79-82.

[3] 张薇,王晓茹,廖国栋.基于广域测量数据的电力系统紧急切负荷控制算法[J].电网技术,2009,33(2):60-73.

[4] 余庆媛,沈沉,乔颖,等.电力系统低压减载和低频减载协调控制策略[J].电力系统自动化,2008,32(23):23-27.

[5] 徐泰山,李碧君,鲍颜红,等.考虑暂态安全性的低频低压减载量的全局优化[J].电力系统自动化,2003,27(10):12-15.

[6] Hsiao Dong C, Ian D, Thomas J R, et al. On voltage collapse in electric power system[J]. IEEE Transactions on Power System, 1990, 5(2):601-611.

[7] Parker C J, Morrison I F, Sutano D. Simulation of load shedding as a corrective action against voltage collapse[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 46(3):235-241.

[8] Aik D L H. A general order system frequency response model incorporating load shedding: analytic modeling and applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2):709-717.

[9] Anderson P M, Mirheydar M. An adaptive method for setting under frequency load shedding relays[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1992, 7(2):647-655.

[10] Terzija V, Koglin H J. Adaptive under frequency load shedding integrated with a frequency estimation numerical algorithm[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution, 2002, 149(6):713-717.

(收稿日期:2014-09-01) EA