

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2016.03.010

考虑连锁跳闸的电网安全裕度研究

邓慧琼

(福建工程学院 信息科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对电网的连锁跳闸现象,对考虑连锁跳闸的电网安全裕度问题进行研究。首先根据连锁跳闸事件中继电保护的動作行为以及连锁跳闸的一般表现,通过分析论证,分别给出利用支路电气参数表示的安全裕度指标,以及利用系统总负荷表示的安全裕度指标,在此基础上,给出求取安全裕度的算法及一种用于定量分析安全裕度的方法;最后通过 IEEE39 节点系统和 IEEE14 节点系统上的算例演示进一步验证该方法的合理性和有效性。

关键词: 电力系统; 连锁跳闸; 连锁故障; 停电事故; 安全裕度

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)03-0255-07

Research on the safety margin of power network considering cascading tripping

Deng Huiqiong

(College of Information Sciences and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To deal with cascading tripping phenomena, the problem of safety margin of power network considering cascading tripping was researched. Firstly, according to the actions of relay protection tripping in cascading tripping event and the general performance of cascading tripping, the safety margin index in terms of electrical parameters of the branches in power network and the safety margin index in terms of the total load of power system were presented. An algorithm of calculating the safety margin of power network considering the cascading tripping was proposed. A method for quantitative analysis of the safety margin of power network considering the cascading tripping was presented. Finally, some examples in IEEE39 system and IEEE14 system were illustrated, which confirmed the rationality and effectiveness of the proposed method.

Keywords: power system; cascade tripping; cascading failure; blackout; safety margin

电网的连锁跳闸及连锁故障问题是电力工作者们比较关注的问题,很多电网的停电事故都是由连锁反应引起的。近十几年来,研究工作者们分别从电网连锁故障的形成机理,连锁故障带来的风险后果,电网结构对连锁故障发展的影响,如何模拟寻找连锁故障的链式路径,以及如何防止连锁跳闸等多种角度对连锁故障问题进行了细致深入的研究,取得了许多可资借鉴的成果^[1-3]。

最近几年来,一些研究又有了一些新的视角。如文献[4]以潮流熵为测度研究了考虑连锁故障的电网脆弱性问题;文献[5]在计及系统频率和负荷变化的基础上从动态潮流的角度进一步给出了电网连锁故障的模型和关键线路的识别方法;文献[6]根据关键线路的特性,结合复杂网络理论提出了计及关键线路的连锁故障事故链搜索框架,并给出了基于优化方法的搜索策略。这些研

收稿日期: 2016-04-27

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01630);福建工程学院科研项目(GY-Z13104)

作者简介: 邓慧琼(1972-),男,山西天镇人,副教授,博士,研究方向:电网连锁故障分析。

究为进一步的研究和探讨提供了很好的借鉴和思路。

通过近些年来发生的停电事故来看,电网的连锁跳闸事件与前级故障发生后电网的重新调整以及元件的后备保护动作有很大的关系,而且电网连锁故障的早期阶段一般表现为连锁跳闸,这一认识得到了比较普遍的认可^[7]。连锁故障一般表现为多级故障,前级故障对后级故障具有连锁影响作用,随着连锁故障的发展,每级故障可能不仅是单纯的连锁跳闸,而是伴随着复杂的动态过程,所以为避免复杂的连锁故障发生,在早期阶段采取措施是比较明智的选择^[8]。文献[8-9]主要研究了初始故障发生后,电网节点注入功率对电网是否发生连锁跳闸的影响作用,对电网节点注入功率与支路电气量之间的关系以及节点注入功率与支路的连锁受扰严重度之间的关系进行了分析,并将线路后备保护的动作为考虑进来,给出了衡量连锁受扰支路发生连锁跳闸的严重度指标,为进一步研究连锁跳闸提供了一种思路,但这些文献没有对初始故障前的电网潮流状态是否能够引发连锁跳闸,以及初始故障前能够引发连锁跳闸与不能引发连锁跳闸的潮流状态之间的关系给出进一步的刻画。

在文献[8-9]的基础上,本文提出了一种考虑连锁跳闸的衡量电网安全裕度的指标和计算方法。首先根据文献[8-9]给出的衡量连锁受扰严重度的指标,给出了用支路电气参数表示的衡量安全裕度的指标;然后根据该指标还不能很好地反映当前运行状态和临界状态之间电网负荷水平的差距的缺陷,进一步给出了依据电网负荷水平表示的安全裕度指标,并针对后一种指标,提出了一种基于连续潮流法计算安全裕度的方法。

1 考虑连锁跳闸的电网安全裕度

由电网连锁跳闸的表现情况可知,当电网中的某一支路 L_{ij} (即介于节点 i 和节点 j 之间的支路)因初始故障停运时,则经过其后的电网重新调整,除支路 L_{ij} 外,其他任一支路 L_{mk} 是否发生连锁跳闸可采用下面的式(1)进行评判^[10]。

$$\omega_{mk \cdot \text{dist}} = |\omega_{mk \cdot \text{lim}}| - |\omega_{mk}| \quad (1)$$

式中, $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 和 ω_{mk} 是与支路 L_{mk} 对应的电气量,其表达形式和取值与具体的后备保护配置有关^[8-9]。例如,若支路 L_{mk} 配置了电流型后备保

护,则 ω_{mk} 取为后备保护测量到的电流值,而 $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 可取为其相应的电流整定值;再如,若 L_{mk} 的后备保护为方向圆特性的距离保护,则 $\omega_{i \cdot \text{lim}}$ 可按距离保护的整定原则取为 $Z_{\text{set}}/2$,而 ω_i 可根据相应的整定原则按 $Z_m - Z_{\text{set}}/2$ 进行取值^[8]。 Z_{set} 表示的是距离保护的定值, Z_m 表示的是测量阻抗。

由式(1)可见,其中的 $\omega_{mk \cdot \text{dist}}$ 给出了 $\omega_{mk \cdot \text{lim}}$ 与 ω_{mk} 之间的电气距离,由连锁跳闸的表现形式可见,当 $\omega_{mk \cdot \text{dist}} < 0$ 时,支路 L_{mk} 将进入后备保护的动作区而发生连锁跳闸;当 $\omega_{i \cdot \text{dist}} > 0$ 时,支路 L_{mk} 将不会发生连锁跳闸;而当 $\omega_{mk \cdot \text{dist}} = 0$ 时支路 L_{mk} 将刚好处于发生连锁跳闸的边界。

根据式(1),在电网初始故障发生后,将除初始故障支路以外的所有支路考虑进来,可给出式(2)所示的指标参量。

$$m_1 = \min(\omega_{mk \cdot \text{dist}}) \quad (2)$$

由式(2)及连锁跳闸的表现可知,在初始故障发生后,当 $m_1 < 0$ 时,电网的剩余支路中必有至少一条支路发生连锁跳闸;当 $m_1 > 0$ 时,电网的剩余支路中的任何一条支路都不会发生连锁跳闸;当 $m_1 = 0$ 时,则电网的剩余支路中至少有一条支路处于连锁跳闸的边界。由此可见, m_1 实际上综合考虑了电网的全部剩余支路,而且还反映了电网剩余支路与发生连锁跳闸边界之间的距离,所以,可以将 m_1 定义为衡量电网是否发生连锁跳闸的安全裕度。这样,对于一个特定的初始故障而言,当 $m_1 = 0$ 时,电网处于连锁跳闸的边界状态;当 $m_1 > 0$ 时,电网对于连锁跳闸保有一定的裕度;当 $m_1 < 0$ 时,电网对于连锁跳闸已经没有裕度。

从上述分析可知, m_1 主要是用支路的电气量给出的一种安全裕度指标,但 m_1 主要反映的是电网当前的运行状态下,其各剩余支路距连锁跳闸边界的远近关系,不能反映 m_1 不同时的系统的负荷情况。例如,若电网在当前运行状态下其 m_1 值大于零,那么当其处于 $m_1 = 0$ 的运行状态下时,系统总负荷与当前运行状态下的总负荷有多大的差距?考虑到这一问题,借鉴电压稳定分析的负荷裕度指标^[11],本文将进一步从系统总负荷的角度给出安全裕度指标。由上述分析可见,对于同一初始故障,若系统在某一运行状态下有 $m_1 = 0$,此时对应于临界状态,设此时系统的总负荷为 P_0 ;若在某一运行状态下 $m_1 > 0$,设此时系统的总

负荷为 P , 则定义如式(3)所示的指标来衡量系统的安全裕度。

$$m_2 = P - P_0 \quad (3)$$

对于 $m_1 < 0$ 的情况, 这时本文将不再从负荷的角度考虑其安全裕度, 因为这个时候系统已经没有安全裕度。

对于处于 $m_1 > 0$ 运行状态下的电网, 如何利用式(3)求取其安全裕度指标, 关键是如何求得 $m_1 = 0$ 时所对应的临界状态。

2 计算安全裕度的算法思路和流程

通过前述的分析, 对于 m_1 的求取, 可根据潮流调整计算去确定。对于 m_2 的求取, 则需要和 m_1 配合进行, 如果 $m_1 < 0$, 则不去计算 m_2 ; 如果 $m_1 = 0$, 则此时对应于临界状态, $m_2 = 0$; 如果 $m_1 > 0$, 此时按式(3)计算 m_2 , 但首先需要计算出来与 $m_1 = 0$ 对应的 P_0 , 为了计算 P_0 , 按照连续潮流^[12]的思路, 从系统的当前状态出发, 逐步搜寻系统的 $m_1 = 0$ 状态, 进而计算出 P_0 , 具体的功率增加形式, 参照文献[11], 给出如下的形式:

$$\begin{cases} P_{Gi}(j+1) = P_{Gi}(j)(1 + \lambda^j) \\ Q_{Gi}(j+1) = Q_{Gi}(j)(1 + \lambda^j) \\ P_{Li}(j+1) = P_{Li}(j)(1 + \lambda^j) \\ Q_{Li}(j+1) = Q_{Li}(j)(1 + \lambda^j) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_{Gi}(j)$ 、 $Q_{Gi}(j)$ 、 $P_{Li}(j)$ 和 $Q_{Li}(j)$ 分别为节点 i 在第 j 次计算时的有功出力、无功出力、有功负荷和无功负荷; $P_{Gi}(j+1)$ 、 $Q_{Gi}(j+1)$ 、 $P_{Li}(j+1)$ 和 $Q_{Li}(j+1)$ 则是上述参量在第 $j+1$ 次计算时的对应取值; λ^j 为第 j 次计算时的节点功率增加量, 其数值在计算过程中可进行调整。

计算安全裕度的具体流程如下:

1) 针对给定的预想初始故障, 计算调整后的潮流结果, 然后根据式(1)和式(2)计算 m_1 的值, 若 $m_1 < 0$, 则转至步骤 c; 若 $m_1 = 0$, 则计算 $m_2 = 0$, 并则转至步骤 c; 若 $m_1 > 0$, 则转入步骤 b。

2) 记录系统当前的总负荷功率, 然后从系统的当前潮流状态出发, 按照式(4)约定的方式逐步增加系统的节点注入功率, 搜索系统的 $m_1 = 0$ 状态。即每次增加节点注入功率后, 针对给定的预想初始故障, 重新计算系统调整后的潮流, 并根据式(1)和式(2)计算 m_1 值。在搜索过程中, 若在第 j 次搜索计算时, 仍满足 $m_1 > 0$, 则令 $\lambda^{j+1} =$

λ^j , 然后继续搜索; 若满足 $m_1 = 0$, 则说明已找到临界状态, 停止搜索, 记录当前的总负荷 P_0 ; 若满足 $m_1 < 0$, 说明此时的搜索已经越过了临界状态, 需要重新调整, 即通过减少节点注入功率以搜寻临界状态。这种情况比较复杂, 为了应对这种情况, 主要思路为: 若第 j 次搜索计算是整个搜索过程中第 1 次出现满足 $m_1 < 0$ 的情况, 则说明第 $j-1$ 次搜索计算仍然满足 $m_1 > 0$, 此时, 令节点的注入功率重新取为第 $j-1$ 次搜索计算时的节点注入功率, 然后缩小 λ^j 的值, 重新调整节点注入功率的值, 然后重新搜索计算。如果重新计算后仍然满足 $m_1 < 0$, 则再次令节点注入功率重新取为第 $j-1$ 次搜索计算时的节点注入功率, 然后再次缩小 λ^j 的值, 然后再次重新计算, 以此类推, 直到达到 $m_1 = 0$ 的状态为止。这里, 对于 λ^j 值的调整, 可按照 λ^j / k 的形式进行, 其中 k 为大于 1 的数, 可根据实际情况选择。对于达到 $m_1 = 0$ 的状态, 本文按 $m_1 < \varepsilon$ 的要求来近似表示, 即当满足 $m_1 < \varepsilon$ 时, 即认为近似达到了搜索的要求。其中 ε 可根据实际情况选取。在这个搜索过程中, 每增加一次节点注入功率, 对应于该节点注入功率状态与 $m_1 = 0$ 状态之间的距离都可以按式(3)进行计算。所以, 包括初始运行状态在内的所有运行状态的 m_2 值都可以进行计算并记录下来, 这样既可计算电网在初始运行状态下的 m_2 值, 也可考察电网随着节点注入功率的增加其安全裕度的变化情况。按照上述的搜索思路, 本算法只记录与 $m_1 \geq 0$ 状态相对应的 m_2 值。

3) 记录结果, 结束计算。将上述的算法步骤归纳起来, 可表示为图 1 所示的流程图。在上面

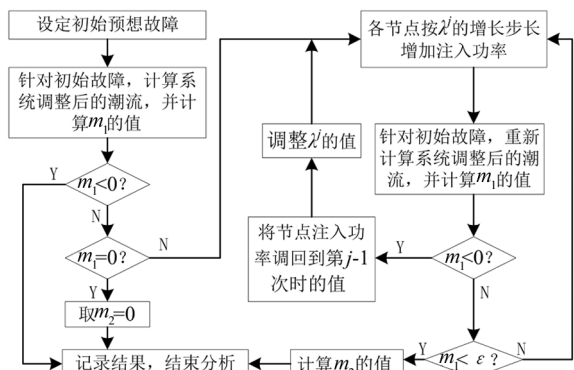


图1 算法流程图

Fig.1 Flowchart of power network safety margin calculation algorithm

的算法中,对于 $m_1 > 0$ 时节点注入功率向 $m_1 = 0$ 状态的搜索,没有采用 m_1 的绝对值小于 ε 的判定形式,主要是始终为了使节点注入功率从 $m_1 > 0$ 状态向 $m_1 = 0$ 状态逼近,从而去掉了越过临界状态的情况。

3 算例分析

针对前面给出的算法,分别采用 IEEE39 节点系统和 IEEE14 节点系统进行算例分析,分析时,在 MATLAB 环境下编写了分析程序,下面分别给出各个算例结果及其说明。

3.1 IEEE39 节点系统上的算例结果

分别选定支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 、 L_{3-18} 作为初始故障进行分析,各支路及其两端的节点的位置可参见图 2 所示的系统接线图。在分析时,由于没有各线路的相关的保护数据,参照文献[8-9]采用虚拟数据进行分析,即假定每一线路的后备保护的电流定值取为某一个值,给出这样的数据主要是为了后面可按照算法的流程去进一步演示分析。在整个计算中,有的地方以标么值给出计算结果,采用标么值计算时,基准容量取为 100 MVA。在后面的分析中,为了进一步考察后备保护的動作电流对安全裕度的影响,本文以电流型保护为例,分别给出了两种保护定值进行分析。

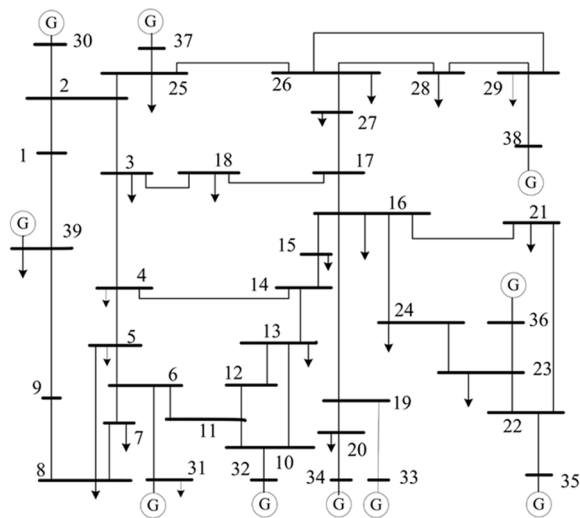


图 2 IEEE39 节点系统接线图

Fig.2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

按照前面给出的算法步骤,这里先给出第 1 个算例,本算例根据设定的 3 条初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 、 L_{3-18} ,针对每一条初始故障支路,分别

进行计算。计算时,假定每一线路的后备保护的电流定值取为 5.77 kA。

1)通过对初始故障支路断开后的潮流计算结果,先计算 m_1 的值,对应于初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 、 L_{3-18} ,其以标么值表示的计算结果分别为: $m_1 = 34.57$ 、 33.73 、 33.88 。这 3 个 m_1 数值都大于零,说明在当前的状态下,电网对于连锁跳闸是有一定的安全裕度的,接下来,按照算法的约定,开始 m_2 的计算。

2)从电网当前的节点注入功率值开始,以 λ^j 的增量,按照式(4)逐步增加节点注入功率,搜寻电网的连锁跳闸临界状态,其中 λ^j 以标么值的形式取为 0.05。满足搜索目标的 $m_1 < \varepsilon$ 条件中, ε 取为 0.1。在搜索过程中若遇到 $m_1 < 0$ 的情况,则将 λ^j 按 λ^j / k 进行处理,以后每遇到一次 $m_1 < 0$ 的情况,都将原来的 λ^j 按 λ^j / k 进行处理,其中 k 取为 10。

设定好上述参数之后,程序进入循环计算,直至 $m_1 < \varepsilon$ 条件得到满足后退出循环;然后计算 m_2 的值。

3)针对各条初始故障支路,整理相应的 m_1 值和 m_2 值以及一些中间结果,最后结束计算。

对于各条初始故障支路,图 3 给出了从电网的初始状态开始直到搜寻到 $m_1 = 0$ 过程中记录的结果,其中 c1 代表以支路 L_{2-3} 为初始故障的情形, c2 代表以支路 L_{17-18} 为初始故障的情形, c3 代表以支路 L_{3-18} 为初始故障的情形。

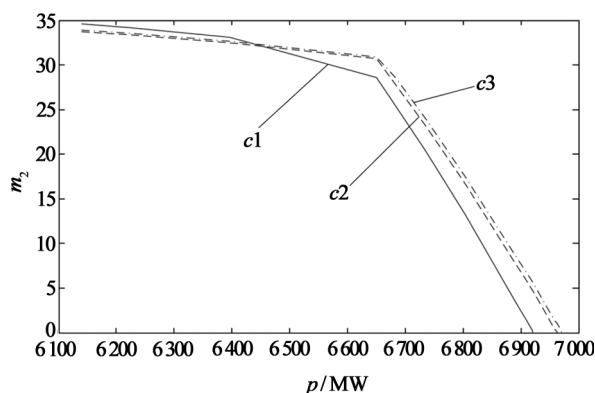


图 3 算例 1 的记录结果

Fig.3 The result of calculation example 1

为了简化计算,图 3 的横坐标为系统的总负荷,这里只计及了总有功负荷,实际上按视在功率考虑时其曲线的形状和图 3 的基本类似,所以这

里只考虑了有功负荷,单位为 MW。图 3 中的纵坐标为不同的运行状态下的 m_2 值,其中包括电网初始运行状态下的 m_2 值,其取值为标么值。在图 3 中,与初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 和 L_{3-18} 相对应的初始运行状态下的 m_2 值分别为 34.55、33.72、33.79。从图 3 可以清晰地看出随着总负荷的增加,电网的 m_2 值呈下降趋势,也即电网逐渐接近于连锁跳闸的临界状态。

在本例中,初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 和 L_{3-18} 的开断都会影响到电网左右两侧功率的交换,所以这 3 条初始故障支路对电网连锁跳闸的影响情况比较类似。特别是初始故障支路 L_{17-18} 和 L_{3-18} ,如图 2 所示,这两条支路位于节点 3 经节点 18 与节点 17 之间的输电通道上,地位很接近,所以这两条支路对电网连锁跳闸的影响更为接近,这一点在图 3 中可以比较清楚地看出来。

为了进一步考察电网的总负荷水平对安全裕度的影响,这里给出了另一个算例,该算例仍以支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 和 L_{3-18} 为初始故障支路,每一线路的后备保护的电流定值假定改为 5.2 kA,比第一个算例的有所减低,具体的操作过程和第一个算例相同。

图 4 给出了这个例子的记录结果,其中, $c1$ 、 $c2$ 和 $c3$ 所代表的含义以及横、纵坐标的含义与图 3 的相同。

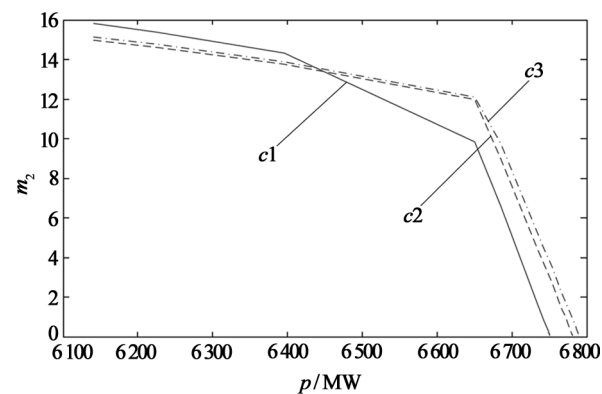


图 4 算例 2 的记录结果

Fig.4 The result of calculation example 2

从图 4 可以看出,由于保护的定值降低,则相应的 m_2 值都降低了,与初始运行状态相对应的 m_2 值分别为 15.76、14.91、15.02,这几个数据分别对应于初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 和 L_{3-18} 。与算例 1 比较,这些数据明显降低了。实际上,不仅 m_2

值, m_1 也降低了,对应于初始故障支路 L_{2-3} 、 L_{17-18} 、 L_{3-18} ,该算例中以标么值表示的初始运行状态下的 m_1 值分别为 15.81、14.97、15.11。这也可算作是一个规律。当然,与图 3 所示的算例 1 中的情况类似,随着电网总的负荷水平的增加,电网对于连锁跳闸的安全裕度是逐渐下降的。

为了对前面算例中得到的规律作出进一步的考察,本文在 IEEE14 节点系统上作了进一步的算例分析。

3.2 IEEE14 节点系统上的算例结果

在此系统上,给出两组算例,与前面在 39 节点系统上的算例类似,两组算例选择同一组初始故障支路,两组算例的后备保护的定值取不同的值。这两组算例分别作为本文的第三组和第四组算例。IEEE14 节点系统的电气接线图如图 5 所示。

采用标么值计算时,系统的基准容量仍选为 100 MVA。当 $m_1 > 0$ 计算 m_2 值时,在第一次遇到 $m_1 < 0$ 之前, λ^j 以标么值的形式取为 0.01,以后每遇到一次 $m_1 < 0$,将 λ^j 按 λ^j / k 进行处理,其中 k 取为 5。

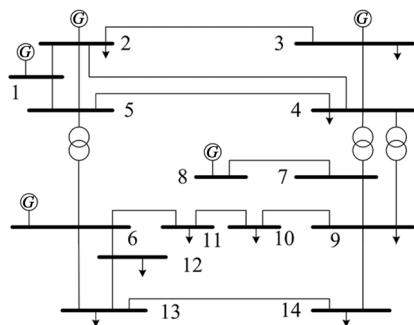


图 5 IEEE14 节点系统接线图

Fig.5 The connection diagram of IEEE14-bus system

每组算例同样考虑了 3 条初始故障的支路,分别为支路 L_{1-5} 、支路 L_{1-2} 和支路 L_{4-5} 。此系统上的第一组算例,即本文的第三组算例,其线路后备保护电流定值假定改为 1.7 kA。计算的结果,对应于初始运行状态,以上各初始故障支路按顺序其对应的 m_1 值分别为:3.44、2.47、5.81。

对于本文的第三组算例,图 6 给出了从电网的初始状态开始直到搜寻到 $m_1 = 0$ 的过程中记录的结果,其横、纵坐标的含义与图 3 相同。其中 $c1$ 、 $c2$ 和 $c3$ 分别代表以支路 L_{1-5} 、支路 L_{1-2} 和支路

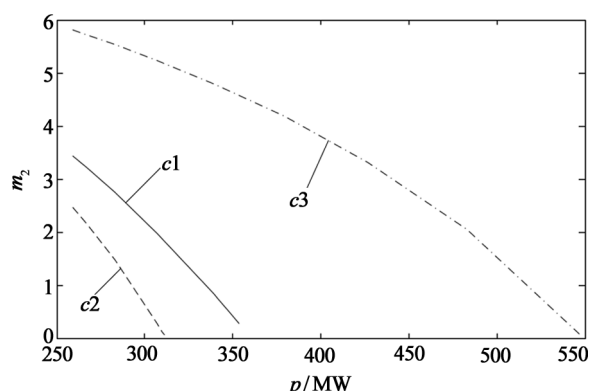


图 6 算例 3 的记录结果

Fig.6 The result of calculation example 3

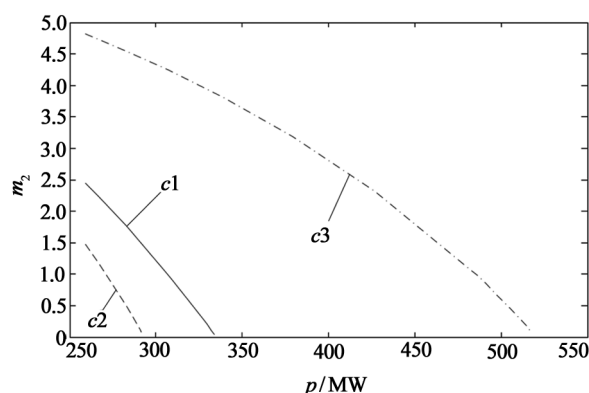


图 7 算例 4 的记录结果

Fig.7 The result of calculation example 4

L_{4-5} 为初始故障的情形。

图 6 所示的算例结果,其情形与图 3 所示的算例结果类似,随着总负荷的增加,电网对于连锁跳闸的安全裕度逐步降低。其初始运行状态对应的 m_2 值按上述支路排列顺序分别为 3.16、2.40、5.73。

对于本文的第四组算例,其线路的后备保护的电流定值假定改为 1.6 kA,其余参数设置与本文的第三组算例相同。计算的结果,对应于初始运行状态,各初始故障支路 L_{1-5} 、 L_{1-2} 和 L_{4-5} 对应的 m_1 值分别为:2.45、1.48、4.82。和前面算例 2 的情形类似,随着保护定值的降低, m_1 值也降低了。

图 7 给出了本文第四组算例从电网的初始状态开始直到搜寻到 $m_1 = 0$ 过程中记录的结果,其横、纵坐标的含义与图 3 的相同。其中 $c1$ 、 $c2$ 和 $c3$ 分别代表以支路 L_{1-5} 、支路 L_{1-2} 和支路 L_{4-5} 为初始故障的情形。其初始运行状态对应的 m_2 值按上述支路排列顺序分别为 2.4、1.39、4.74。图 7 的情形与图 4 所示的情形类似,随着保护定值的降低, m_2 值也降低了。

在以上的算例分析过程中,对于 $m_1 > 0$ 时计算 m_2 值的情形,考虑到不断增加电网的节点注入功率时,系统的潮流有可能不收敛。同时,在初始

故障切除后,系统的潮流也可能存在不收敛的情况。对于这两种情况,由于它们不属于连锁跳闸的情形,本文不再往下计算,在算例的程序设计中,专门设置了分支部分,一旦遇到这两种情况则退出运行。

从上述算例分析中可知,通过计算电网当前初始运行状态可以比较清晰地把握电网距离发生连锁跳闸的电气距离。尤其是对 m_2 值的计算,可以用来把握电网当前的负荷水平对于电网连锁跳闸的影响,而且能从裕度的角度予以定量的把握。

4 结论

在初始故障发生后,电网因连锁效应而出现的连锁跳闸事件与电网所拥有的安全裕度不足有关。对于考虑连锁跳闸的安全裕度,本文从支路电气量与电网总负荷水平两个角度分别给出了安全裕度指标和计算方法。通过算例分析表明,随着电网总负荷水平的增长,电网对于连锁跳闸的安全裕度呈下降趋势,这个规律具有一定的普遍性。此外,线路后备保护的定值对于连锁跳闸的影响也具有明显的影响,随着其定值的降低,电网对于连锁跳闸的安全裕度也呈下降趋势。本文所提出的考虑连锁跳闸的安全裕度指标以及相应的计算方法,可为电网运行研究提供一定的借鉴。

参考文献:

- [1] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等.关于电力系统相继故障研究的评述[J].电力系统自动化,2013,37(19):1-9,40.
- [2] 石立宝,史中英,姚良忠,等.现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J].电网技术,2010,34(3):48-54.
- [3] 刘友波,胡斌,刘俊勇,等.电力系统连锁故障分析理论与应用(一)——相关理论方法与应用[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):148-155.

[4] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等.基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):40-46.

[5] 谭玉东,李欣然,蔡晔,等.基于动态潮流的电网连锁故障模型及关键线路识别[J].中国电机工程学报,2015,35(3):615-622.

[6] 马志远,石立宝,姚良忠,等.电网连锁故障的事故链搜索模型及策略研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3292-3302.

[7] 董新洲,丁磊,刘琨,等.基于本地信息的系统保护[J].中国电机工程学报,2010,30(22):7-13.

[8] 邓慧琼,李培强,郑荣进. 电网连锁故障中的受扰支路及其关关节点分析[J].福建工程学院学报,2015,13(3):223-228.

[9] 方卫东,邓慧琼. 电网连锁跳闸事件中的关键节点研究[J].福建工程学院学报,2015,13(3):223-228.

[10] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等.电力系统电压稳定性分析及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.

[11] 苗显峰,郭志忠.电压安全域的最小负荷裕度计算[J].电机与控制学报,2010,14(10):68-72.

[12] 邓慧琼,王帅,孙克军.考虑潮流水平变化的电网二级连锁过载中的涨落现象研究[J].河北科技大学学报,2012,33(4):313-318.

(责任编辑：肖锡湘)

(上接第 231 页)

品牌社群也可以与人气餐厅或是漫画师等进行跨界合作,针对不同车型的社群成员提供不同的福利,将人气餐厅作为品牌社群的专属领地,可每月推出三天的人气餐厅下午茶品鉴活动,车主可到餐厅享受免费的专属下午茶。或是与漫画设计师合作,推出成员专属车贴。此外,针对现在的雾霾天气,也可为俱乐部车主提供免费的原厂空调清洗服务。这一系列活动福利,能满足社群成员的物质诉求,使之更喜爱与依赖品牌俱乐部。

3 结语

通过调查分析,进一步了解了目前汽车行业消费者对线下品牌社群的理解,也发现汽车线下

俱乐部面临的经营挑战。本研究表明,线下汽车品牌社群对车主的生活方式、购车消费行为均产生一定的影响,车主通过加入汽车品牌社群(汽车俱乐部),在一定程度上可增加人脉等资源,丰富了生活,对品牌的感知度和忠诚度均有一定的提高。值得一提的是,线下汽车品牌社群的发展已经陷入瓶颈时期,存在感不高,很多方面有待提高和改进。可采取加强品牌文化建设、“圈层式”的体验享受设计、意见领袖和成员的角色平衡、打造新型在线品牌社群和推出成员专属福利等经营策略,引导汽车厂商建立良好的品牌社群推动汽车企业科学发展。

参考文献：

[1] Muniz A M, Jr O' guinn T C. Brand community[J].Journal of Consumer Research,2001,27(4):412-432.

[2] 瞿艳平,程凯.品牌忠诚度测评指标体系及模型研究[J].湖南商学院学报,2011,18(1):67-69.

[3] 苏奕婷,王兴元.两种品牌社群类型的形成路径初探[J].东岳论丛,2015,36(5):120-125.

[4] 任枫.品牌社群形成机理研究——基于品牌社群融入的视角[J].河北经贸大学学报,2013,34(6):104-109.

[5] 严宏伟. 公司品牌社群的管理策略研究[J].中国商贸,2011(21):59-60.

(责任编辑：肖锡湘)