

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190733

基于节点电动机最大自起动量的配电网低压减载

林莉¹, 罗皓¹, 杨仕燕², 贾源琦¹, 汪莎莎¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

摘要: 低压减载是电力系统安全稳定第三道防线的重要组成部分, 而减载方案是低压减载的重要研究内容。感应电动机是造成电网电压崩溃的主要因素, 也是低压减载的主要负荷。基于配电网及感应电动机有功特性、无功特性、转子运动方程等在 Matlab 搭建模型进行时域仿真分析。结果表明低压减载后的电网存在感应电动机的自起动过程, 且以感应电动机为减载对象时, 自起动的最大允许量与最小减载量有紧密联系。从而提出一种基于节点电动机最大自起动量的减载量整定计算方法以及减载策略。即通过不同初始转速下的节点电动机最大自起动量计算出每轮减载量, 考虑减载速度对电压稳定性的影响, 可在每轮减载中引入基于电压变化率的加速判据, 实现有选择性地加速切除负荷。最后对传统减载策略和所提减载策略进行对比仿真, 验证了所提减载方案在保证节点电压快速稳定的同时可实现对减载量的有效控制, 从而保证了系统和重要电动机负荷的安全稳定运行。

关键词: 低压减载; 感应电动机; 减载量; 节点电动机最大自起动量

An under voltage load shedding method for distribution network based on maximum self-starting amount configuration of node motor

LIN Li¹, LUO Hao¹, YANG Shiyan², JIA Yuanqi¹, WANG Shasha¹

(1. State Key Laboratory of Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China; 2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: The Under Voltage Load Shedding (UVLS) is an important part of the third line of defense for power system safety and stability, and a load shedding scheme is an important part of research. Induction motors are the main cause of grid voltage collapse and the main load of under voltage load shedding. Based on distribution network and the active features, reactive features and rotor motion equations of induction motor, a time-domain simulation by a Matlab construction model shows that the induction motor self-starts after under voltage load shedding. When taking the induction motor as a load shedding object, the maximum allowable amount of self-starting is closely related to the minimum load reduction. A method for calculating the load shedding based on maximum self-starting amount configuration of the node motor is proposed. The load reduction per wheel is calculated by the maximum self-starting amount of the node motor at different initial rotational speeds. Considering the effect of load shedding speed on voltage stability, an acceleration criterion based on voltage change rate can be introduced in each round of load shedding, so as to selectively accelerate the removal load. Finally, the traditional and the proposed load shedding strategy are simulated and compared. The proposed method can effectively control the load shedding and ensure that the node voltage stabilizes rapidly, thus ensuring the safe and stable operation of the system and important motor loads.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50807055).

Key words: under voltage load shedding; induction motors; load shedding; maximum self-starting amount configuration of node motor

0 引言

近年来, 世界上许多国家的大电网相继发生了

严重的电压崩溃事故, 例如 2003 年美国一加拿大 8.14 大停电^[1-3], 2012 年 7 月底印度大停电事故等, 这些电压崩溃事故不仅暴露了电力系统电压稳定的脆弱性, 也表明了提高电压稳定性以保障电力系统安全稳定运行的要求已日渐紧迫^[4]。低压减载(Under

Voltage Load Shedding, UVLS)作为电力系统安全稳定第三道防线的重要组成部分^[5-6],是防止大扰动导致系统电压崩溃最直接有效的控制手段^[7-9]。但是,目前尚未形成统一的针对低压减载的计算标准和配置方法^[10]。相关规程也只是提出了减载的一般原则,特别是减载量的计算还未有公认的合适方法,对于具体的减载量方案建议是在时域仿真中尝试不同的低压减负荷方案,从中选择较优的方案^[11]。因此,低压减载量计算仍是一个有待进一步深入研究的课题。

目前,低压减载广泛采用多轮减载方式,即在电压低于某一指定的门限值并满足延长时实施减载。减载量大多依赖于工程人员的经验,具有较强的主观性而缺乏科学性。不少文献提出预先设定固定减载量^[12],然而当运行工况变化时,固定的减载量控制方案无法及时对控制策略作出调整,从而可能导致严重的欠切或过切。关于减载量计算,有文献提出采用灵敏度方法^[13-15]、改进遗传算法^[16]、分枝限界法^[17]优化计算减载量。文献[18]通过设定总的减载容量,再利用静态 PV 曲线求得有功不平衡量和潮流追踪算法确定减载对象及其各自分担的减载量。文献[19]提出了一种通过“搜索+校验”将切负荷量的优化问题转化为求解可满足性问题,从而实现低压减载和低频减载协调控制的方法。文献[20]通过无功缺额和所构建的电压稳定评价指标计算出减载量和减载地点。文献[21]应用点估法和蒙特卡洛仿真分析制定了概率型低压减载方案。文献[22]在固定减载量的基础上,提出利用节点负荷模型的等效电纳变化量作为分配指标来确定各节点减载量,提出了综合考虑负荷电压、无功响应和频率的减载方案。

电压稳定性破坏与负荷特性紧密相关,感应电动机作为主要的动态负荷,在配电网负荷中所占比重较大,是引起电压失稳的最关键最直接的因素。因此,感应电动机负荷应是低压减载配置整定研究中不可忽略的重要因素。上述方案中,减载量的计算未计及感应电动机负荷对电压稳定性的动态影响。本文以简化的配电网系统为例,证明电网中每个节点感应电动机最大自起动力与最小减载量密切相关。因此,为保证减载成功且尽可能减小减载量,本文以感应电动机作为减载对象,提出一种基于节点电动机最大自起动力的减载量计算方法,并通过仿真验证其有效性及工程的实用性。

1 配电系统及感应电动机动态特性

1.1 配电系统运行特性

配电系统直接对负荷供电。研究表明,电力系

统的电压稳定性破坏通常始发于负荷端,然后逐步向电源端扩散,导致大面积的电网电压稳定性破坏。研究低压减载的常规配电网简化等值电路如图 1 所示。图中: \dot{U}_0 、 \dot{U}_1 分别为母线 0 和母线 1 的电压; $P_1 + jQ_1$ 为上一级电网对母线 3 注入功率; $P_L + jQ_L$ 为负荷吸收的有功、无功功率; jQ_C 为补偿的无功功率。

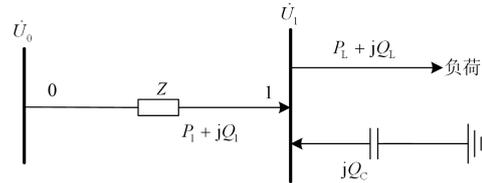


图 1 配电网等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of distribution network

在恒有功功率条件下,计及电阻的配电网功率角方程为

$$P_1 = \frac{U_0 U_3 \sin(\delta + \theta) - U_3^2 \sin \theta}{Z} \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{U_0 U_3 \cos(\delta + \theta) - U_3^2 \cos \theta}{Z} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{R}{X}\right) \quad (3)$$

式中: θ 为阻抗角; δ 为电网运行的功率角。由式(1)一式(3)可以导出配电网无功功率与阻抗角方程为

$$Q_3 = \frac{U_0 U_1 \cos\left(\frac{\arcsin\left(\frac{P_1 Z + U_1^2 \sin \theta}{U_0 U_1}\right)}{\right) - U_1^2 \cos \theta}{Z} \quad (4)$$

1.2 感应电动机运行特性

电压稳定主要取决于系统和负荷之间无功功率平衡的维持或恢复能力^[23-24]。感应电动机负荷在配电网负荷中比重很大,是最重要的无功负荷,其无功功率对电压变化非常灵敏。当电网发生短路、断线、大容量冲击负荷投入等扰动时,负荷节点电压短时下降,导致感应电动机的电磁功率大幅度下降,机械功率和电磁功率失去平衡,从而引起感应电动机转速降低甚至堵转、转差率增大^[25-26],造成感应电动机吸收的无功功率显著增加,引起负荷节点电压大幅度下降。同时,电源与负荷间线路的压降也因电动机电流的增大而增大,这将会进一步降低负荷节点电压,增加负荷节点电压崩溃的可能性,甚至导致大面积电网电压崩溃。因此,电压崩溃主要是由具有快速调节特性的感应电动机负荷引起的。

在稳定运行状态下,基于感应电动机简化等值

电路^[27]可得感应电动机运行时消耗的有功功率和无功功率特性方程为

$$P_M = \frac{U^2}{X_\sigma^2 + \left(\frac{R_r}{s}\right)^2} \frac{R_r}{s} \quad (5)$$

$$Q_M = Q_m + Q_\sigma = \frac{U^2}{X_m} + \frac{U^2}{X_\sigma^2 + \left(\frac{R_r}{s}\right)^2} X_\sigma \quad (6)$$

式中: Q_m 为激磁无功功率; Q_σ 为漏抗无功功率; U 为感应电动机机端电压; X_m 为激磁电抗; X_σ 为漏抗; R_r 为转子等值电阻; s 为转差率。

感应电动机转子运动方程为

$$T_J \frac{ds}{dt} = \frac{P_L - P_M}{1-s} \quad (7)$$

$$s = 1 - \omega \quad (8)$$

式中: P_L 为感应电动机的机械功率; T_J 为感应电动机的惯性常数; ω 为转子电角速度 ω_r 的标幺值, $\omega = \omega_r / \omega_0$, ω_0 为定子磁场电角速度。

感应电动机的机械转矩 T_L 为

$$T_L = A\omega^2 + B\omega + C \quad (9)$$

式中, A 、 B 、 C 分别为感应电动机的机械转矩系数。由式(5)可得机械功率为

$$P_L = A\omega^3 + B\omega^2 + C\omega \quad (10)$$

2 感应电动机自启动与低压减载的关系

低压减载是第三道防线的重要组成部分, 是大扰动情况下保证电力系统电压稳定的紧急控制手段。因此, 在进行低压减载分析时应主要考虑大扰动电压稳定。由于感应电动机是造成电网电压崩溃的主要因素, 若想通过低压减载恢复电压稳定, 感应电动机应是主要的减载对象。通过切除部分感应电动机, 减少负荷从系统吸收的无功功率, 有利于电网电压恢复。因此, 文中主要考虑切除感应电动机负荷。

2.1 低压减载动态特性

本文以图 2 所示的某实际配电网为例, 根据前述小节确定的配电系统、感应电动机动态特性在 Matlab 中编程建模进行低压减载仿真分析。其中, 变压器 T_1 — T_3 容量分别为 240 MVA、63 MVA、40 MVA; 感应电动机参数分别为 $X_m = 3.3$, $X_\sigma = 0.15$, $R_r = 0.0127$, $T_J = 5$ s, $A = B = 0$, $C = 1$ 。取基准容量为 12.5 MVA, 变压器 T_1 高、中、低三个绕组电抗分别为 0.005 1、0、0.005 5; 变压器 T_2 高、中、低三个绕组电抗分别为 0.022 4、0、0.01 6; 变压器 T_3 的电抗为 0.04; 线路 L1—L4 的电抗分别

为 0.005 3、0.02、0.000 1 和 0.000 1; 节点 8 和节点 9 感应电动机负荷功率分别为 0.95 和 2; 额定状态下, 节点 6 和节点 7 所接恒阻抗负荷功率分别为 0.05 和 0.5(功率因数为 0.75), 电容器电抗分别为 1.6 和 1。

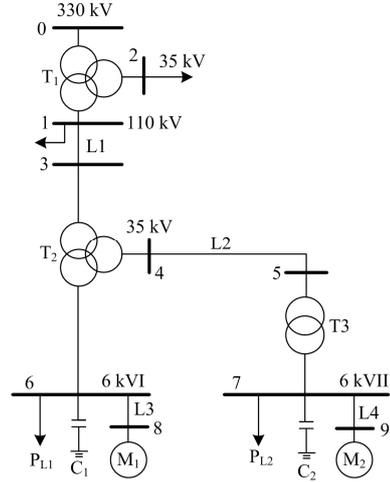


图 2 配电网接线

Fig. 2 Circuit of distribution network

为探讨低压减载的动态特性, 设置两种低压减载方案, 且均只有一轮基本轮, 具体参数如表 1 所示。

表 1 低压减载方案汇总表

Table 1 UVLS schemes

方案	动作电压/p.u.	延时/s	减载量占总负荷的比例/%
1	0.85	1.2	10
2	0.85	1.2	40

在图 2 系统中, 设系统电压 $\dot{U}_0 = 1.05 \angle 0^\circ$ 。设置扰动: 当 $1 \text{ s} \leq t \leq 1.5 \text{ s}$ 时, 受到扰动后系统电压下降至 0.4, $t > 1.5 \text{ s}$ 后系统电压恢复。采用表 1 中的减载方案, 对节点 7 进行减载操作, 对比仿真扰动过程中的各参数变化的动态过程, 结果如图 3 所示。图中, U_7 为节点 7 电压, P_M 、 P_L 、 Q_M 、 s 分别为节点 9 所接感应电动机负荷的电磁功率、机械功率、无功功率和转差率。

由图 3 仿真结果可知, 减载瞬间, 随着部分感应电动机负荷的切除, 总的感应电动机电磁功率、无功功率、机械功率瞬间减小。但由于电压几乎没变, 保留的感应电动机等效阻抗却减小, 导致电流增大, 保留感应电动机的电磁功率和无功功率又瞬间增大。其中, 采用方案 1 减载后, 保留感应电动机负荷的电磁功率与机械功率的差值大于 0, 即电磁功率大于机械功率, 引起转差率减小; 转差率的减小又引起感应电动机等效阻抗增大, 电流减小,

导致无功功率减小,电压增大;电压的增大和转差率的减小共同引起电磁功率增大;转差率的减小还促使机械功率增大,如此反复耦合。当越过临界点后,电磁功率开始减小,直到最终电磁功率和机械功率平衡后,转差率也恢复到稳定,即转速恢复稳定,节点7电压也恢复稳定。而方案2的减载量相对较少,在采用方案2减载后,节点7保留的感应电动机负荷的电磁功率与机械功率的差值小于0,引起转差率继续增大,等效阻抗减小,电流增大,导致无功功率增大,电压减小;电压和转差率共同引起电磁功率减小;转差率的增大还促使机械功率减小,如此反复耦合。由于电磁功率与机械功率的差值一直小于0,所以转差率一直增大,最终转速恢复失败,节点7电压也失稳。

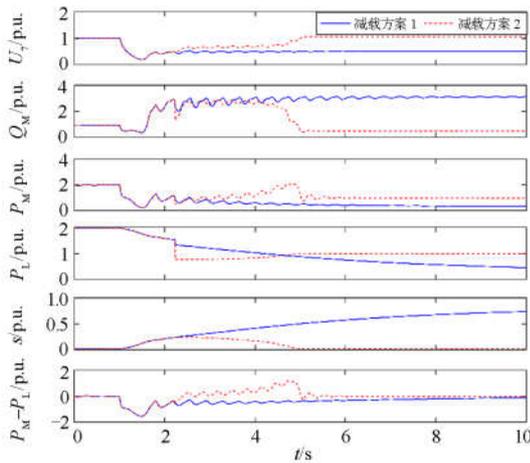


图3 低压减载动态过程曲线

Fig. 3 Dynamic process of under voltage load shedding

由此可知,低压减载后电网中保留感应电动机负荷存在转速恢复的过程,即保留感应电动机负荷的自启动过程。节点电压是否恢复稳定,关键在于减载后保留的感应电动机负荷的转速是否能够恢复,若转速恢复,则节点电压稳定,否则,节点电压失稳。且低压减载成功的重要标志就是减载后保留感应电动机自启动成功。

2.2 节点电动机最大自启动量的确定

感应电动机自启动指的是电动机母线电压下降时感应电动机转速随之下降甚至停转,当母线电压恢复时感应电动机重新升速的过程。感应电动机自启动的动态过程是一个有功、无功和转差率三者之间相互耦合、反馈作用的机电过程:电磁功率 P_M 与机械功率 P_L 的不平衡引起转速即转差率变化,转差率的变化影响感应电动机吸收的无功 Q_M ,从而引起运行电压 U 的变化,进一步影响电磁功率 P_M 。

根据式(5)和式(10)可得感应电动机的有功-转差率特性,如图4所示。图中:曲线1、2、3、4分别对应感应电动机端电压即节点电压 $U=1、0.8、0.7、0.6$ 时的感应电动机电磁功率;曲线5是感应电动机机械功率。

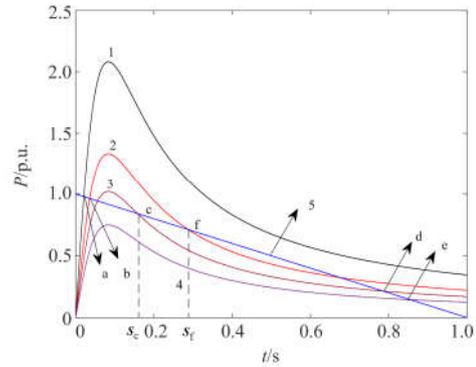


图4 感应电动机有功-转差率特性曲线

Fig. 4 Power-slip characteristic curves of induction motor

感应电动机自启动成功即是转速能够恢复至额定转速附近,由图4可知,这主要取决于感应电动机电磁功率和机械功率在转差特性上的交点性质:

1) 节点电压很高($U=1$),电磁功率和机械功率只有一个交点a,且交点a处于电磁功率上升段,即 $dP_M/ds > 0$,则自启动必然成功。

2) 节点电压很低($U=0.6$),电磁功率和机械功率交于点e。虽然点e是小扰动稳定点,但因转差较大,自启动必然失败。

3) 节点电压较高($U=0.7$),电磁功率和机械功率有三个交点。其中,点b为小扰动稳定平衡点,点c为小扰动不稳定点,点d为稳定破坏后的小扰动平衡点。自启动存在两种可能,由自启动时感应电动机的初始转速确定:当初始转速高于点c所对应的速度,则会进入点b运行,自启动成功;当初始转速低于点c所对应的速度,则会进入点d运行,自启动失败。点c所对应的转速为自启动成功的最低转速。

4) 当初始转速为点c对应的转速时,只要电压不低于0.7,感应电动机自启动成功,因此电压 $U=0.7$ 为点c对应初始转速的允许自启动成功的最低电压。当 $U=0.8$ 时,点f所对应的转速为最低转速,f点初始转速对应的允许自启动成功的电压为 $U=0.8$,且 $s_f > s_c$,即点c的转速大于点f的转速。所以最低允许电压和最低允许转速存在一一对应关系,且随着节点电压的增大,允许的最低转速就减小;随着初始转速的增大,允许的最低电压也减小。

由此可得出,节点电压和感应电动机自启动时的初始转速是影响自启动能否成功的关键因素:当初始转速一定时,节点电压若不低于允许最低电压,则感应电动机自启动成功;当节点电压一定时,初始转速若不低于允许最低转速,则感应电动机自启动成功。

2.3 节点电动机最大自启动量分析

当同一节点上同时有大量感应电动机负荷参与自启动时,总的自启动电流会很大,从而引起供电变压器和线路阻抗的压降大大增加,导致节点电压大大降低。当节点电压低于允许自启动的最低电压,则自启动必然失败。因此,为了保证节点上的感应电动机负荷能够自启动成功,自启动的感应电动机负荷量需要受到限制。配电网中节点允许自启动成功的最大感应电动机负荷量,本文称为节点电动机最大自启动量。

系统电源与感应电动机的等效电路如图5所示。图中: \dot{E} 为系统电源电压; $R+jX$ 为系统阻抗; \dot{U} 为感应电动机节点电压; \dot{i} 为感应电动机定子电流; \dot{i}_m 为激磁电流; \dot{i}_r 为转子电流; X_m 为激磁电抗; X_σ 为漏抗; R_r 为转子等值电阻; s 为转差率。

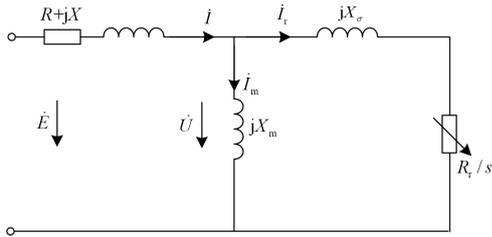


图5 系统电源与感应电动机等值电路

Fig. 5 Equivalent circuit of system power supply and induction motor

感应电动机自启动与节点电压和初始转速有关。为便于分析,将所有感应电动机负荷自启动初始转速设置相同。在电网参数和每台感应电动机自身参数确定的情况下,由图5可知:当系统电压 \dot{E} 一定时,随着自启动感应电动机负荷量的增多,即参与自启动的感应电动机数量的增多,节点上感应电动机的等效阻抗减小,引起电流 \dot{i} 增大;电流的增大引起系统阻抗 $R+jX$ 的压降增大,导致节点电压 \dot{U} 下降;由于随着节点电压的增大,允许的最低转速就增大,所以对应的感应电动机允许最低转速就增大。因此,在电网参数和感应电动机自身参数一定的情况下,当系统电压一定时,随着初始转速的增大,节点电动机最大自启动量也增大。通过2.2

节分析可知,当初始转速一定时,允许的最低节点电压 \dot{U} 就恒定。所以,当系统电压增大时,允许的系统阻抗 $R+jX$ 的压降就增大,允许的电流 \dot{i} 就增大,允许的节点感应电动机等效阻抗也就减小,则对应的节点电动机最大自启动量就增大。

因此,在电网和感应电动机自身参数一定的情况下,节点电动机最大自启动容量与系统电压和初始转速有关:当系统电压一定时,随着初始转速的增大,节点电动机最大自启动量就增大;当初始转速一定时,随着系统电压的增大,节点电动机最大自启动量也增大。

2.4 节点电动机最大自启动量计算过程

系统电压、初始转速、电网和感应电动机参数确定时,节点电动机最大自启动量即确定。本文采用时域仿真进行反复迭代计算节点电动机最大自启动量。其中,自启动时的运行参数初始值是基于自启动前的潮流计算结果,具体计算过程如下:

1) 给定电网参数、感应电动机参数、系统电压 \dot{U}_0 、初始转速 $\omega^{(0)}$ 、节点电压初值 $U_i^{(0)}$ 、 $\delta_i^{(0)}$ 和修正值 ΔP ,且 $\Delta P < \varepsilon$,即满足一定精确度。

2) 给定节点感应电动机自启动容量,即额定负荷量 $P_{LN(0)}$ 。

3) 进行自启动计算:

(1) 计算出节点导纳矩阵 Y 。

(2) 将节点电压初值代入式(5)和式(6),计算出节点感应电动机的电磁功率 $P_M^{(0)}$ 和无功功率 $Q_M^{(0)}$,并计算出节点上所接其他元件的有功功率和无功功率。

(3) 将第(2)步计算出的节点感应电动机和其他元件的有功功率和无功功率以及节点电压初值 $U_i^{(0)}$ 、 $\delta_i^{(0)}$ 代入式(1)和式(2),计算出节点功率不平衡量 $\Delta P_i^{(0)}$ 、 $\Delta Q_i^{(0)}$ 和雅克比矩阵各个元素 $H_{ij}^{(0)}$ 、 $N_{ij}^{(0)}$ 、 $J_{ij}^{(0)}$ 、 $L_{ij}^{(0)}$ 。

(4) 再将第(3)步所求值代入修正方程式(3),求出节点电压的变化量 $\Delta U_i^{(0)}$ 、 $\Delta \delta_i^{(0)}$,再通过式(4)计算出修正后的电压新值 $U_i^{(1)}$ 、 $\delta_i^{(1)}$ 。

(5) 将 $P_{LN(0)}$ 和 $\omega^{(0)}$ 代入式(10),计算出初始机械功率 $P_L^{(0)}$ 。

(6) 将机械功率 $P_L^{(0)}$ 和电磁功率 $P_M^{(0)}$ 代入式(7),求出转差率 $s^{(1)}$,再根据式(8)求出转速 $\omega^{(1)}$,并通过式(10)求出机械转矩 $P_L^{(1)}$ 。

(7) 将节点电压新值 $U_i^{(1)}$ 、 $\delta_i^{(1)}$ 自第(2)步开始进

入下一次迭代计算，直至迭代结束。

4) 判断感应电动机自启动是否成功，即感应电动机转速是否恢复到额定值附近或节点电压是否稳定。若自启动失败则修正自启动容量为 $P_{LN(1)} = P_{LN(0)} - \Delta P$ ，自第 2) 步进入下一次自启动计算；若自启动成功则修正自启动容量为 $P_{LN(1)} = P_{LN(0)} + \Delta P$ ，自第 2) 步进入下一次自启动计算，直至求出节点电动机最大自启动容量。

具体计算流程如图 6 所示。

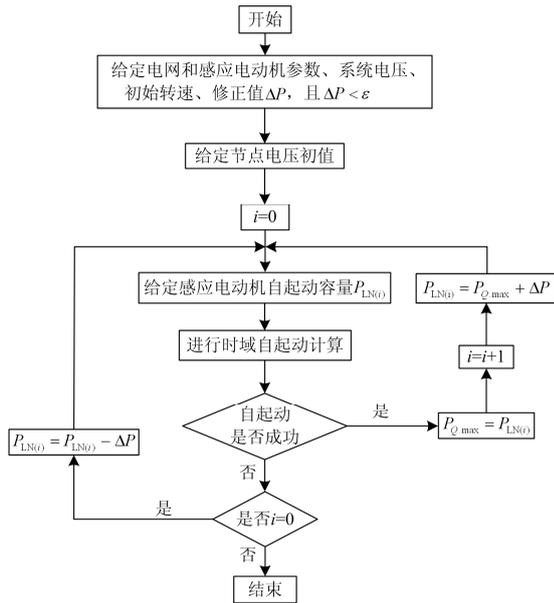


图 6 节点电动机最大自启动量计算流程图

Fig. 6 Flow chart of the maximum self-starting motor power

在图 2 系统中，电网和感应电动机参数已确定，分别进行如下计算：

1) 设系统电压 $\dot{U}_0 = 1.05 \angle 0^\circ$ ，仿真计算出在不同初始转速下的节点 7 电动机最大自启动量，结果列于表 2。

2) 设初始转速为 0.8，仿真计算出在不同系统电压下的节点 7 电动机最大自启动量，结果列于表 3。

由表 2 可知，当系统电压一定时，随着初始转速的增大，节点电动机最大自启动量也增大，且当初始转速为 0~0.5 时，节点电动机最大自启动量缓慢增大；当初始转速大于 0.5 后，节点电动机最大自启动量大幅度增大。因为初始转速为 0~0.5 时，对应的转差率为 1~0.5，相对较大，引起等效阻抗缓慢减小，导致感应电动机自启动电流缓慢减小，节点电压缓慢增大，因此最大自启动容量就缓慢增大。由表 3 可知，当初始转速一定时，随着系统电压的增大，节点电动机最大自启动容量也增大。结果与 2.2 节分析结论一致。

表 2 节点 7 电动机最大自启动量 (不同初始转速)

Table 2 Maximum self-starting motor power of node 7 with different initial speed

自启动初始转速/p.u.	最大自启动量/p.u.
0	0.88
0.1	0.89
0.2	0.9
0.3	0.91
0.4	0.92
0.5	0.94
0.6	1.01
0.7	1.18
0.75	1.34
0.8	1.56
0.82	1.67
0.83	1.74
0.85	1.93
0.9	2.9

表 3 节点 7 电动机最大自启动量 (不同系统电压)

Table 3 Maximum self-starting motor power of node 7 with different system voltage

自启动初始转速/p.u.	最大自启动量/p.u.
1.05	1.56
1.03	1.5
1.01	1.44
0.99	1.38
0.97	1.31
0.95	1.25
0.93	1.18

2.5 节点电动机最大自启动量与最小减载量的关系

低压减载后动态过程是保留感应电动机的自启动过程，低压减载成功的实质是电网中保留感应电动机自启动成功。若以感应电动机为减载对象，则节点的最小减载量就与节点能够自启动成功的最大保留感应电动机负荷量互补。而节点感应电动机最大保留负荷量就是节点低压减载后对应条件下的节点电动机最大自启动量。因此，低压减载的节点电动机最小减载量与节点电动机最大自启动量互补。节点电动机最小减载量的求取可变为低压减载后节点电动机最大自启动量的求取。即为

$$P_{\min} = P - P_{Q,\max} \quad (11)$$

式中： P_{\min} 为节点电动机最小减载量； P 为低压减载前节点感应电动机负荷量； $P_{Q,\max}$ 为节点电动机最大自启动量。

在图 2 系统中，设系统电压 $\dot{U}_0 = 1.05 \angle 0^\circ$ ，并设置两种系统电压扰动：

1) $1s \leq t \leq 2s$ 时，系统电压下降至 0.55， $t > 2s$

时系统电压恢复。

2) $1\text{s} \leq t \leq 2\text{s}$ 时,系统电压下降至 0.6, $t > 2\text{s}$ 时系统电压恢复。

均减载一轮,通过时域仿真计算出节点 7 的电动机最小减载量,结果列于表 4。

表 4 节点 7 最小减载量

Table 4 Minimum load reduction of node 7

扰动	动作 电压/p.u.	最小 减载量/p.u.	最大自启动量 (保留量)/p.u.	最低 转速/p.u.
1	0.89	0.40	1.60	0.820 6
2	0.89	0.31	1.69	0.835 4

由表 2 和表 4 可知,当低压减载后动态过程中的最低转速与自启动初始转速相同时,减载后节点电动机最大自启动量(即最大保留量)与计算的节点电动机最大自启动量接近,即计算的节点电动机最大自启动量和最小减载量接近互补。其误差主要是因为系统电压受到扰动后,系统电压存在变化过程,与固定系统电压计算的节点电动机最大自启动量存在条件差异,这是不可避免的。也说明了计算的节点电动机最大自启动量与实际低压减载中的最小减载量接近互补,具有较高的准确性。

3 基于电动机最大自启动量的低压减载方案

3.1 基于节点电动机最大自启动量确定减载量

由此提出一种新的减载量计算方法:感应电动机为减载对象时,以节点电动机最大自启动量为依据,将减载量的计算改为保留量的计算。在电网和感应电动机参数确定的情况下,设定系统电源电压,计算出不同初始转速下的节点电动机最大自启动量。将相同转速下减载节点的感应电动机保留容量不大于节点电动机最大自启动量作为减载计算的必要条件,通过将不同初始转速对应的节点电动机作为各轮次的感应电动机负荷保留量,从而计算出各轮的减载量。具体计算步骤如下:

1) 设定系统电压目标恢复值:在电网和感应电动机参数一定的情况下,设定系统电源电压目标恢复值。根据《电力系统电压和无功电力技术导则》规定,事故后电压的容许偏差为额定电压的 $-10\% \sim +10\%$ 。因此,系统电压目标恢复值可选择为额定电压的 $-10\% \sim +10\%$ 。

2) 计算节点电动机最大自启动量:在设定的系统电压目标恢复值下,实时计算出电网中各节点在不同初始转速 $0, \omega_1, \dots, \omega_{N-1} (0 < \omega_1 < \dots < \omega_{N-1} < 1)$ 下对应的节点电动机最大自启动量 P_0, P_1, \dots, P_{N-1} 。

3) 设置各轮的初始转速:根据已设置的减载轮

次,确定各减载轮次的初始转速,即减载过程中感应电动机的最低转速,且初始转速应依次减小,具体如下:

(1) 为确保减载成功,最后一轮减载轮次的初始转速设置为 0,对应的节点电动机最大自启动量即为该节点的最小允许保留量。

(2) 其余减载轮次的初始转速则通过已计算出的节点电动机最大自启动容量,结合减载方案的延迟时间和动作电压进行分析设置。动作电压越高或延迟时间越短,则初始转速应设置越大;动作电压越低或延迟时间越长,则初始转速应设置越小。其中,首轮初始转速对应的节点电动机最大自启动容量应小于减载前节点的感应电动机负荷容量;并且由于初始转速为 $0 \sim 0.5$,对应的节点电动机最大自启动容量变化较小,因此倒数第二减载轮次的初始转速可设置为大于 0.5。首轮与倒数第二轮之间的初始转速可采取均匀分布设置。

4) 计算各轮减载量:若减载轮次为 M 轮 ($M \leq N$),且依次对应的初始转速为 $\omega_i, \omega_j, \dots, \omega_k, 0 (0 < \omega_k < \dots < \omega_j < \omega_i < 1)$ 。其中, ω_i, ω_j 和 ω_k 分别表示第一减载轮次、第二减载轮次和倒数第二减载轮次的初始转速;0 为最后一轮减载轮次的初始转速。则可根据各减载轮次初始转速对应的节点电动机最大自启动量,计算各减载轮次的减载量。具体计算为

$$\begin{cases} \Delta P_1 = P - P_i \\ \Delta P_2 = P_i - P_j \\ \vdots \\ \Delta P_M = P_k - P_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: P 为减载前节点感应电动机负荷容量; $P_i, P_j, \dots, P_k, P_0$ 分别为初始转速 $\omega_i, \omega_j, \dots, \omega_k, 0$ 所对应的节点电动机最大自启动量; $\Delta P_1, \Delta P_2$ 和 ΔP_M 分别为第一减载轮次、第二减载轮次以及第 M 减载轮次的减载量。

3.2 低压减载方案配置

那么,基于节点电动机最大自启动量的配电网低压减载方案的具体配置步骤如下。

1) 设置减载轮次:减载基本轮数可设置为 2~5,不设置特殊轮。

2) 设置各轮次动作电压:根据不同区域电压稳定问题的具体情况,合理设置各轮次的动作电压和延迟时间,且各轮次不应越级动作。根据《电力系统自动低压减负荷技术规定》,首轮的動作电压应低于系统长期允许的最低电压,最后一轮的動作电压

应高于系统静态电压失稳的临界电压，且每轮的电压级差可选为 2%~5%。除此之外，在《电力系统安全稳定导则》中还规定，在非同步运行过程中，电网枢纽变电所或接有重要用户的变电所的母线电压不得低于 0.75，而感应电动机的临界电压一般是 0.8 左右。且据《电力系统电压和无功电力技术导则》，规定发生扰动后的电压容许偏差值为额定电压的 -10%~+10%，即变电站的电压稳定不得低于 0.9。

3) 设置各轮次延迟时间：由《电力系统自动低压减负荷技术规定》可知，每轮的动作延时可选为 0.2~5 s，其主要取决于当地负荷特性。因为负荷的动态变化特性是电力系统电压稳定的重要影响因素之一，对于不同的负荷模型，电压随负荷功率的变化过程也存在快慢之分。因此，延迟时间也应根据负荷的具体分布具体设置。感应电动机负荷较多的地区，延迟时间应较小，反之，则应设置大一些。

4) 计算减载量：根据前述步骤进行计算。

由此可得出具体的低压减载方案，如表 5 所示。

表 5 低压减载方案

Table 5 Scheme of under voltage load shedding

减载轮次	动作电压/p.u.	延时/s	初始转速/p.u.	减载量/p.u.
1	U_1	t_1	ω_i	$\Delta P_1 = P - P_i$
2	U_2	t_2	ω_j	$\Delta P_2 = P_i - P_j$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
M	U_M	t_M	0	$\Delta P_M = P_k - P_0$

4 仿真分析

在图 2 系统中，设系统电压 $\dot{U}_0 = 1.05\angle 0^\circ$ 。以节点 7 为例，基于节点电动机最大自起动量进行低压减载方案配置如下。

1) 设置减载轮次：减载基本轮数设置为 2~5，本文设置 4 轮。

2) 设置各轮次动作电压：本文设置首轮动作电压为 0.89，级差选为 0.3，则各轮次动作电压分别为 0.89、0.86、0.83、0.8。

3) 设置各轮延迟时间：由于节点 7 的感应电动机负荷比重较大，为防止负荷过切，首轮延迟时间设置为 1 s，每轮次延迟时间按照 0.2 s 依次增加。则各轮次的动作延时分别为 1 s、1.2 s、1.4 s、1.6 s。

4) 计算各轮次减载量。

(1) 计算节点电动机最大自起动量：设定系统电压目标恢复值为 $\dot{U}_0 = 1.05\angle 0^\circ$ ，通过时域仿真计算出在不同初始转速下的节点 7 电动机最大自起动量，结果列于表 2。

(2) 设置各轮初始转速：通过对已计算出的节点

7 电动机最大自起动量可知。第一轮初始转速对应的节点电动机最大自起动容量应小于减载前节点的感应电动机负荷容量，因此，第一轮初始转速设置为 0.8；为确保减载成功，第四轮初始转速设置为 0；初始转速从 0~0.5 对应的节点电动机最大自起动容量变化较小，因此第三轮初始转速设置为 0.6；第二轮初始转速设置为 0.7。因此，各轮初始转速依次为 0.8、0.7、0.6、0。

(3) 根据各轮次初始转速所对应的节点电动机最大自起动量计算出各轮减载量，即：

$$\Delta P_1 = P - P_{0.8} = 0.44$$

$$\Delta P_2 = P_{0.8} - P_{0.7} = 0.38$$

$$\Delta P_3 = P_{0.7} - P_{0.6} = 0.17$$

$$\Delta P_4 = P_{0.6} - P_0 = 0.13$$

换算成百分比则为 17.6%、15.2%、6.8%、5.2%。

由此可得低压减载新方案如表 6 所示。

表 6 低压减载新方案

Table 6 New scheme of under voltage load shedding

减载轮次	动作电压/p.u.	延时/s	减载量/%	减载量/p.u.
1	0.89	1	17.6	0.44
2	0.86	1.2	15.2	0.38
3	0.83	1.4	6.8	0.17
4	0.8	1.6	5.2	0.13

目前，传统减载一般根据经验设置固定减载量，总的减载量不能少于该地区负荷的 10%~20%，一般设置在 10%~40%^[28-29]。本文选取为 40%，为便于与本文所提新减载方案进行比较，传统减载方案也设置四轮，各轮减载量分别为 15%、10%、10%、5%，在本算例中换算成标么值即为 0.375、0.25、0.25、0.125。并且各轮减载动作电压和减载动作延时的设置也均与新减载方案一致。具体减载方案如表 7 所示。

表 7 传统低压减载方案

Table 7 Traditional scheme of under voltage load shedding

减载轮次	动作电压/p.u.	延时/s	减载量/%	减载量/p.u.
1	0.89	1	15	0.375
2	0.86	1.2	10	0.25
3	0.83	1.4	10	0.25
4	0.8	1.6	5	0.125

在图 2 系统中，设系统电压 $\dot{U}_0 = 1.05\angle 0^\circ$ ，并设置两种系统电压扰动：

1) $1\text{s} \leq t \leq 1.5\text{s}$ 时，系统电压下降至 0.5， $t > 1.5\text{s}$ 时系统电压恢复；

2) $1\text{s} \leq t \leq 1.4\text{s}$ 时，系统电压下降至 0.3， $t > 1.4\text{s}$ 时系统电压恢复。

在扰动 1 下, 分别对节点 7 实施新减载方案和传统减载方案, 对应的节点 7 电压动态过程曲线如图 7 所示。其中, 采用新减载方案减载一轮后电压恢复稳定, 其减载总量为 0.44; 采用传统减载方案减载两轮后电压恢复稳定, 其减载总量为 0.625。

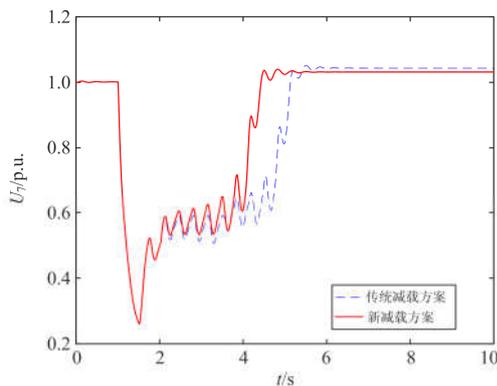


图 7 不同减载方案下的节点 7 电压动态曲线 (扰动 1)
Fig. 7 Voltage curve of node 7 with different UVLS schemes (disturbance 1)

由图 7 可知, 采用传统减载方案后, 节点 7 的电压恢复值为 1.043, 且电压恢复时刻为 $t=5.19$ s; 采用新减载方案后, 节点 7 的电压恢复值为 1.031, 且电压恢复时刻为 $t=4.41$ s。由此可知, 采用两种低压减载方案减载后均实现了电压稳定, 但采用新减载方案切除的减载轮次和减载量更少, 电压恢复速度也更快。因此, 按照节点电动机最大自启动量配置的新减载方案不仅实现了更加快速有效地恢复电压稳定, 同时还有效控制了减载量, 保证了重要负荷的可靠运行。

在扰动 2 下, 分别对节点 7 实施新减载方案和传统减载方案, 对应的节点 7 电压动态过程曲线如图 8 所示。其中: 采用新减载方案减载四轮后, 电

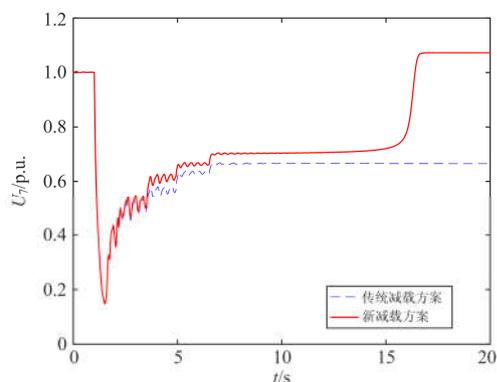


图 8 不同减载方案下的节点 7 电压动态曲线 (扰动 2)
Fig. 8 Voltage curve of node 7 with different UVLS schemes (disturbance 2)

压恢复稳定, 减载总量为 1.12; 采用传统减载方案减载四轮后, 电压仍失稳, 减载总量为 1。

由图 8 可知: 采用传统减载方案后, 节点 7 的电压恢复值为 0.665; 采用新减载方案后, 节点 7 的电压恢复值为 1.068。由此可知, 新减载方案最终实现了电压稳定, 但传统减载方案未能阻止电压失稳。所以, 按照节点电动机最大自启动量配置的新减载方案较传统减载方案更能有效地保证电压稳定, 确保系统安全稳定运行。

5 结论

感应电动机是引起配电网电压崩溃的主要因素, 也是低压减载的主要对象。低压减载后动态过程的实质是电网中保留感应电动机的自启动过程, 且减载成功的重要标志就是保留感应电动机自启动成功。影响自启动能否成功以及保证自启动成功的最大自启动容量的关键因素是电动机节点电压和电动机自启动初始转速。在系统电压、电网和感应电动机参数一定的情况下, 节点电动机最大自启动量仅电动机初始转速相关; 当以感应电动机作为减载对象时, 节点最小减载量与节点电动机最大自启动量之间存在互补关系。因此, 以感应电动机负荷为减载对象, 本文提出了以节点电动机最大自启动量为依据, 将相同转速下减载节点的感应电动机保留容量不大于节点电动机最大自启动量作为减载量计算的必要条件, 确定不同初始转速对应的节点电动机最大自启动量, 以此作为各轮次减载的负荷保留量, 从而实现减载量的整定计算。与传统凭经验配置计算减载量相比, 不仅可以提高减载量设置的精确度和减载成功的可靠性, 还能有效控制减载量, 保证了重要负荷的可靠运行, 并为时域仿真计算减载量提供了原理依据, 易于实时计算。

参考文献

- [1] 袁志昌, 夏涛. 低压减载整定方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 136-142.
YUAN Zhichang, XIA Tao. An overview of setting method of under voltage load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 136-142.
- [2] 徐泰山, 李峰, 张建新, 等. 各类紧急减负荷控制的在线风险评估和协调决策方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 91-97.
XU Taishan, LI Feng, ZHANG Jianxin, et al. Online risk assessment and coordinated decision scheme for emergency load shedding control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 91-97.
- [3] 王锐, 顾伟, 万秋兰, 等. 考虑二重预想事故的在线电

- 压稳定预防控制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(10): 62-66.
- WANG Rui, GU Wei, WAN Qiulan, et al. Online preventive control for voltage stability considering supervenient contingency[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(10): 62-66.
- [4] 吴小珊, 涂亮, 柳勇军, 等. 同步和异步运行电网暂态电压稳定性分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 1-7, 48.
- WU Xiaoshan, TU Liang, LIU Yongjun, et al. Transient voltage stability analysis of AC/DC hybrid power grid with synchronous and asynchronous operation[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 1-7, 48.
- [5] 张曼, 缪源诚, 常宝立, 等. 考虑负荷频率特性的可中断负荷切除策略研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5): 155-160.
- ZHANG Man, MIAO Yuancheng, CHANG Baoli, et al. Interruptible load shedding scheme considering load frequency characteristics[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5): 155-160.
- [6] 梁捷. 基于可中断负荷分级削减的发电调度模型研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(7): 61-66.
- LIANG Jie. Study on power generation scheduling model based on hierarchical reduction of interruptible load[J]. Smart Power, 2018, 46(7): 61-66.
- [7] 中国国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical guide for electric power system security and stability control: GB/T 26399—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.
- [8] 侯玉强, 李威, 郑惠萍, 等. 解列后局部孤网的自适应第三道防线配置方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 176-181.
- HOU Yuqiang, LI Wei, ZHANG Huiping, et al. Third defense line configuration method adaptable to isolated local power grid after splitting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 176-181.
- [9] 李祝昆, 宣筱青, 叶振风, 等. 智能变电站架构下的低频低压减载装置技术思路[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 19-22.
- LI Zhukun, XUAN Xiaoqing, YE Zhenfeng, et al. Technical ideas of low frequency and low voltage load shedding devices in smart substation architecture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 19-22.
- [10] 马世英, 易俊, 孙华东, 等. 电力系统低压减载配置原则及方案[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 45-49.
- MA Shiyong, YI Jun, SUN Huadong, et al. Study on configuration of under-voltage load shedding in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5): 45-49.
- [11] 国家能源局. 电力系统自动低压减负荷技术规定: DL/T 1454—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- National Energy Administration. Technical guide on automatic undervoltage load shedding of power system: DL/T 1454—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [12] 黄雯, 梅吉明, 黄彦全, 等. 基于降阶雅可比矩阵的低压减载整定方法研究[J]. 电气开关, 2014, 52(4): 53-56.
- HUANG Wen, MEI Jiming, HUANG Yanquan, et al. Study on low voltage load shedding setting method based on reduced order Jacobian matrix[J]. Electric Switchgear, 2014, 52(4): 53-56.
- [13] 陈泽龙. 电力系统低压减载配置整定优化策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- CHEN Zelong. Research on the configuration and setting optimization strategy of power system under-voltage load shedding[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [14] 李卫星, 牟晓明, 孙勇. 基于解析灵敏度的低压切负荷优化控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 67-73.
- LI Weixing, MOU Xiaoming, SUN Yong. An undervoltage load shedding method based on analytical sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 67-73.
- [15] 和敬涵, 陈泽龙, TONY Y, 等. 低压减载广域配置及站域整定优化方案[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2333-2339.
- HE Jinghan, CHEN Zelong, TONY Y, et al. Optimization scheme for under-voltage load shedding wide-area configuration and substation-area setting[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2333-2339.
- [16] OTOMEGA B, CUTSEM T V. Undervoltage load shedding using distributed controllers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1898-1907.
- [17] 先逸, 刘新宇, 薄其滨, 等. 基于 PSASP 的低压减载优化整定研究[J]. 电气开关, 2015, 53(1): 61-65.
- XIAN Yi, LIU Xinyu, BO Qibin, et al. Research on low voltage reduced load optimum setting based on PSASP[J]. Electric Switchgear, 2015, 53(1): 61-65.
- [18] 吴耀东, 梁海峰, 高亚静, 等. 基于潮流追踪算法的自适应低频减载策略研究[J]. 中国电力, 2015, 48(3): 61-66.
- WU Yaodong, LIANG Haifeng, GAO Yajing, et al. Research on adaptive UFLS strategy based on power

- flow tracing algorithm[J]. *Electric Power*, 2015, 48(3): 61-66.
- [19] 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.
SHE Qingyuan, SHEN Chen, QIAO Ying, et al. A coordinated load shedding scheme for both under-voltage and under-frequency load shedding[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(23): 23-27.
- [20] ADEWOLE A C, TZONEVA R, APOSTOLOV A. Adaptive under-voltage load shedding scheme for large interconnected smart grids based on wide area synchrophasor measurements[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(8): 1957-1968.
- [21] AMRAEE T, KAFFASHAN I. Probabilistic undervoltage load shedding using point estimate method[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(15): 2234-2244.
- [22] 李晔, 张保会. 基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(6): 106-111.
LI Ye, ZHANG Baohui. Load shedding scheme optimization based on load voltage and reactive power[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(6): 106-111.
- [23] KUNDUR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1387-1401.
- [24] 陆玉军, 李澄, 江红成, 等. 基于网荷终端的用户低压负荷紧急控制[J]. *电力工程技术*, 2018, 37(3): 43-47, 54.
LU Yujun, LI Cheng, JIANG Hongcheng, et al. Emergency load shedding of user low voltage based on grid-load terminal[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2018, 37(3): 43-47, 54.
- [25] 何青, 李国庆, 王立健, 等. 汽轮发电机功率-负荷不平衡保护仿真分析[J]. *热力发电*, 2018, 47(11): 102-108.
HE Qing, LI Guoqing, WANG Lijian, et al. Simulation of power-load unbalanced protection for turbo-generator[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(11): 102-108.
- [26] 王家胜, 赵杰, 钟晶亮, 等. 超临界机组甩负荷试验超速原因分析及处理[J]. *热力发电*, 2018, 47(8): 115-119.
WANG Jiasheng, ZHAO Jie, ZHONG Jingliang, et al. Reason analysis and treatment for over-speed of load rejection test of supercritical units[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(8): 115-119.
- [27] 海世芳, 孙士云, 范小红, 等. 计及频率特性的感应电动机参数变化对负荷特性的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(8): 17-25.
HAI Shifang, SUN Shiyun, FAN Xiaohong, et al. Influence of induction motor parameter change considering frequency characteristics on load characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(8): 17-25.
- [28] 刘蔚, 赵勇, 苏寅生, 等. 电力系统低压减载配置和整定方法综述[J]. *南方电网技术*, 2015, 9(2): 36-42.
LIU Wei, ZHAO Yong, SU Yinsheng, et al. Review on configuration and setting methods of under voltage load shedding of power systems[J]. *Southern Power System Technology*, 2015, 9(2): 36-42.
- [29] 李鹏飞, 顾雪平, 杨超, 等. 考虑潮流转移对系统影响的低频减载方案优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(18): 156-163.
LI Pengfei, GU Xueping, YANG Chao, et al. Optimization of low-frequency load shedding scheme considering the influence of power flow transferring on the power system[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 156-163.

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-08-29

作者简介:

林莉(1974—),女,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: linli@cqu.edu.cn

罗皓(1997—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: 806474217@qq.com

(编辑 葛艳娜)