

基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化

李 晔, 张保会

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于感应电动机一阶模型, 推导了计及节点负荷无功变化和电压偏移程度的切负荷量分配指标。该指标从物理意义上相当于节点负荷等效电纳的变化量, 其大小能反映节点负荷中感应电动机所占比例和不同负荷模型对暂态电压稳定性的影响程度。利用该指标分配各节点的切负荷量, 提出了综合考虑系统频率、负荷电压及无功响应的自适应减载方案。IEEE 39 节点系统的仿真结果表明, 所提出方案较经典自适应控制方案更有利于保障系统在大扰动后的电压稳定性和频率稳定性。

关键词: 电力系统; 暂态电压稳定性; 频率稳定性; 自适应控制; 切负荷; 稳定性

中图分类号: TM 72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.016

0 引言

电压稳定性、频率稳定性和功角稳定性是系统稳定性的 3 个主要方面, 电压和频率作为衡量电能质量的重要指标, 其稳定性已得到国内外的广泛关注^[1-3]。然而, 由于传统低频减载和低压减载装置还存在分散配置、缺乏信息交换、未考虑频率变化率等缺点, 在严重故障下可能造成负荷的过切或者欠切。几起国际上的大停电事故也说明了传统的减载方案在保障极端故障情况下电力系统的电压稳定性和频率稳定性方面还存在着一些不足之处^[4-5]。

目前, 随着同步相量测量技术^[6-7]在广域测量系统 WAMS (Wide-Area Measurement System) 中的应用和不断发展, 已有不少学者提出了综合考虑电压和频率响应的自适应减载方案。文献[8]基于 WAMS, 利用频率变化率获得系统有功缺额, 并根据所提出的电压稳定性指标 VQS 进行切负荷量的分配。文献[9]将实际有功缺额与系统能承受的最大有功缺额进行比较, 确定自适应减载方案的总切负荷量, 并利用导纳矩阵和电压相量构建了电压稳定性判别指标 L 以确定切负荷地点和切负荷量。文献[10]提出暂态电压稳定性判别指标 VSRI, 并根据有功缺额的不同设计了 2 套自适应减载方案。文献[11]使用潮流追踪法, 利用频率偏移量和电压稳定性判别指标 VQS 分别确定负荷的有功切除量和无功切除量, 构建了综合考虑频率与电压响应的自适应减载方案。

然而, 上述方案的切负荷量计算过程往往过于复杂, 所需信息量大, 对通信技术的要求较高。另外, 上述方案没有充分计及感应电动机负荷对电压稳定性和频率稳定性的影响。通过文献[12-14]的分析可知, 当系统发生严重故障时, 感应电动机在负荷中所占比例越大, 系统越可能发生负荷电压失稳以及频

率过高等问题。因此, 在充分计及感应电动机负荷特性, 综合考虑系统频率与电压响应的基础上进行切负荷极有必要^[15-16]。然而, 如何得知节点负荷中感应电动机所占比例却是一个难题。

本文从感应电动机一阶等效模型出发, 推导了计及负荷无功功率变化和电压偏移程度的切负荷量分配指标, 该指标在物理意义上相当于负荷等效电纳变化量, 指标大小不仅能衡量不同负荷模型对暂态电压稳定性的影响程度, 同时还能反映感应电动机在该节点负荷中所占比例大小。本文利用该指标分配各节点的切负荷量, 构建了综合考虑系统频率、负荷电压及无功响应的自适应减载方案。

1 切负荷量分配指标

电力系统的电压稳定性问题与发电、传输系统以及负荷特性有着密切联系, 传输网络的强度和功率传输水平、发电系统无功和电压调节的限制、负荷和无功补偿设备的电压特性等共同决定着系统的电压稳定水平^[5]。系统发生暂态电压失稳主要与系统传输能力受限和负荷特性的影响有关。目前, 随着感应电动机动态负荷的日益增加, 由负荷动态特性导致暂态电压失稳的可能性也随之加大^[17-19]。本节将从感应电动机模型出发, 推导由负荷无功和电压变化量构成的切负荷量分配指标, 通过该指标来反映负荷特性对电压稳定性的影响。

图 1 为感应电动机一阶等效模型, 图中, U 为机端电压; $R_s + jX_s$ 为定子阻抗; $R_r/s + jX_r$ 为转子阻抗, s

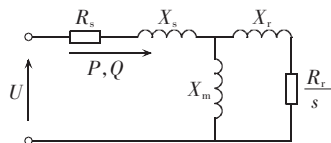


图 1 感应电动机一阶等效模型
Fig.1 Equivalent first-order model
of induction motor

为感应电动机转差率; X_m 为磁化电抗; $P+jQ$ 为感应电动机吸收的功率。

根据图 1,忽略磁化电抗 X_m ,可得感应电动机所吸收无功功率的表达式为:

$$Q = \frac{U^2(X_s + X_r)}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad (1)$$

式(1)中转差率 s 对应的转子运动微分方程如下:

$$2H(s) = T_m(s) - T_e(U, s) \quad (2)$$

其中, H 为惯性常数; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩,其大小与 U^2 成正比。

忽略式(2)中转差率 s 对机械转矩 T_m 和电磁转矩 T_e 的影响,当感应电动机机端电压 U 下降时,电磁转矩 T_e 将迅速减小,导致转差率 s 增大;根据式(1)可知,虽然无功 Q 随着 U 下降而减少,但 s 增大会造成电动机无功功率在扰动初期减少后又迅速增加^[13],加剧电压失稳过程。因此,转差率 s 的增加可以反映节点负荷暂态电压扰动大小和负荷稳定程度。然而,在实际系统中,负荷构成无法预测,感应电动机的转差率变化也难以获得。故将式(1)等号左右同除以 U^2 得:

$$\frac{Q}{U^2} = \frac{X_s + X_r}{\left(R_s + \frac{R_r}{s}\right)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad (3)$$

如式(3)所示,可通过测量 Q/U^2 的变化(可测量)来反映转差率 s (不可测量)的变化,进而反映暂态电压稳定性和负荷稳定性。 Q/U^2 从物理意义上看相当于感应电动机的等效电纳,本文即以等效电纳的变化量 $\Delta Q/U^2$ 构成如下 Y 指标来进行切负荷量的分配:

$$Y(t) = \Delta \frac{Q(t)}{U^2(t)} = \frac{Q(t)}{U^2(t)} - \frac{Q(t_0)}{U^2(t_0)} \quad (4)$$

其中, $Y(t)$ 为扰动后 t 时刻的切负荷量分配指标大小; $Q(t)$ 和 $Q(t_0)$ 分别为扰动后 t 时刻以及扰动瞬间负荷吸收的无功功率; $U(t)$ 和 $U(t_0)$ 分别为扰动后 t 时刻以及扰动瞬间的负荷电压。 Y 指标与负荷吸收无功成正比,与负荷电压的平方成反比,在负荷无功需求增加或者电压跌落的情况下该指标将迅速增大,扰动后,节点的 Y 指标越大,则该节点的暂态电压稳定性越差。

对于感应电动机,将式(3)代入式(4)可得其 Y 指标为:

$$Y(t) = \frac{X_s + X_r}{\left(R_s + R_r/s(t)\right)^2 + (X_s + X_r)^2} - \frac{X_s + X_r}{\left(R_s + R_r/s(t_0)\right)^2 + (X_s + X_r)^2} \quad (5)$$

其中, $s(t)$ 和 $s(t_0)$ 分别为扰动后 t 时刻和扰动瞬间感应电动机的转差率。当 s 增大时,相应的 Y 指标也

增大。

电力系统的负荷中除了感应电动机,还包括恒阻抗负荷、恒电流负荷以及恒功率负荷。由这 3 种负荷类型构成的节点负荷,其有功、无功功率可用式(6)和(7)所示多项式模型(ZIP 模型)描述:

$$P_L = \left(A_P \frac{U^2}{U_0^2} + B_P \frac{U}{U_0} + C_P\right) P_0 \quad (6)$$

$$Q_L = \left(A_Q \frac{U^2}{U_0^2} + B_Q \frac{U}{U_0} + C_Q\right) Q_0 \quad (7)$$

其中, A_P, A_Q 分别为恒阻抗负荷在该节点的有功和无功负荷中所占比例; B_P, B_Q 分别为恒电流负荷所占比例; C_P, C_Q 分别为恒功率负荷所占比例; U_0 为负荷的额定电压; P_0, Q_0 分别为负荷的额定有功功率和额定无功功率。将这 3 种负荷模型的无功表达式分别代入式(4)可得,恒阻抗负荷、恒电流负荷及恒功率负荷的 Y 指标分别如式(8)—(10)所示。

$$Y(t) = \Delta \frac{X_Z}{(R_Z + jX_Z)^2} = 0 \quad (8)$$

$$Y(t) = \Delta \frac{U(t)I_c \sin \varphi_c}{U^2(t)} = \frac{I_c \sin \varphi_c}{U(t)} - \frac{I_c \sin \varphi_c}{U(t_0)} \quad (9)$$

$$Y(t) = \Delta \frac{Q_c}{U^2(t)} = Q_c \left(\frac{1}{U^2(t)} - \frac{1}{U^2(t_0)} \right) \quad (10)$$

其中, $R_Z + jX_Z$ 为恒阻抗负荷的阻抗; I_c 和 $\sin \varphi_c$ 分别为恒电流负荷的电流和阻抗角正弦大小; Q_c 为恒功率负荷的额定无功功率。

ZIP 模型中,恒功率负荷对电压稳定性影响最严重,恒电流负荷次之,恒阻抗负荷对电压稳定性影响最小。当系统发生扰动时,恒功率负荷的 Y 指标与电压平方成反比,恒电流负荷的 Y 指标与电压的一次方成反比,恒阻抗负荷的 Y 指标始终为 0。因此,对于恒阻抗负荷、恒电流负荷以及恒功率负荷,其对电压稳定性影响越大,发生扰动时相应的 Y 指标也升高越快。

将 ZIP 模型与感应电动机比较,由式(7)可知,对于 ZIP 模型,当电压跌落时,其无功功率不变或者减少,相应的 Y 指标增长较小;而对于感应电动机,由前述分析已知,其机端电压跌落时会造成转差率升高,使得负荷所吸收的无功功率增加,形成正反馈,从而进一步加快电压跌落,其 Y 指标增长迅速,在相同故障下感应电动机的 Y 指标将大于 ZIP 模型的 Y 指标。

综上所述,对于不同负荷模型(感应电动机、恒阻抗、恒电流、恒功率模型), Y 指标大小差异明显。 Y 指标大小不仅能衡量不同负荷模型对暂态电压稳定性的影响程度,还能反映感应电动机在该节点负荷中所占比例大小。扰动后负荷节点的 Y 指标越大,则该节点的暂态电压稳定性越差,即该节点应切除更

多的负荷。

2 基于负荷无功电压响应的切负荷控制决策优化

当系统出现严重扰动时,系统频率与负荷电压往往发生迅速跌落甚至崩溃,而传统减载方案仅根据本地信息进行切负荷,各减载装置间缺少信息交换,减载后可能无法保障系统稳定性。因此,设计一套综合考虑系统频率和负荷无功电压响应的自适应减载方案具有重要价值。本文基于切负荷量分配新指标,构建了如下自适应减载方案。

2.1 系统有功缺额计算

当系统频率与电压跌落时,通过 WAMS 将各发电机组的频率变化率传输到系统的控制中心,控制中心按照式(11)即可计算扰动发生瞬间全网的实际有功缺额:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{N_0} \Delta P_i = \frac{1}{f_n} \sum_{i=1}^{N_0} T_i S_i \frac{df_i}{dt} \quad (11)$$

其中, i 为各机组序号; N_0 为机组数量; ΔP_i 为第*i*台机组测得的可有功缺额; T_i 为第*i*台机组惯性时间常数; S_i 为第*i*台机组额定容量; f_n 为额定频率 50 Hz; df_i/dt 为第*i*台机组在扰动发生瞬间的频率变化率。

2.2 各节点切负荷量计算

系统需要切除的负荷量与全网有功缺额相等。若在全网进行切负荷,在获得了全网有功缺额之后,则可根据式(12)计算扰动后 0.5 s(即 $t=0.5\text{ s}$)时各节点负荷的 Y 指标大小。此处 0.5 s 的延时设置一方面是为了保证负荷的电压和无功功率在该段时间内有一定的变化量从而使得不同负荷节点的 Y 指标有较明显的差异,另一方面是为了与短路等故障造成的电压骤降相区别,不影响继电保护装置的动作。而后,根据式(13)将总切负荷量按一定比例分配到各个负荷节点。

$$Y_j(t) = \Delta \frac{Q_j(t)}{U_j^2(t)} = \frac{Q_j(t)}{U_j^2(t)} - \frac{Q_j(t_0)}{U_j^2(t_0)} \quad j=1,2,\dots,N \quad (12)$$

$$\Delta P_j = \frac{Y_j(t)}{\sum_{j=1}^N Y_j(t)} \Delta P \quad j=1,2,\dots,N \quad (13)$$

其中, j 为负荷节点序号; $Y_j(t)$ 为扰动后 t 时刻第 j 个负荷节点的 Y 指标; $Q_j(t)$ 和 $Q_j(t_0)$ 分别为扰动后 t 时刻和扰动瞬间第 j 个负荷所吸收的无功功率; $U_j(t)$ 和 $U_j(t_0)$ 分别为扰动后 t 时刻和扰动瞬间第 j 个负荷的节点电压; ΔP_j 为第 j 个负荷节点的切负荷量; N 为负荷节点总数; $\sum_{j=1}^N Y_j(t)$ 可由 WAMS 实时获得。

然而,全网切负荷方案并未充分考虑各负荷母线电压失稳程度的差异,因此,本文利用式(14)作为切

负荷地点选择判据,即将各负荷节点按照电压从小到大进行排序,并且仅选择母线电压不高于 0.9 p.u. 的负荷节点作为减载地点。

$$U_1 \leq U_2 \leq \dots \leq U_M \leq 0.9 \text{ p.u.} \leq U_{M+1} \leq \dots \leq U_N \quad (14)$$

其中, M 为母线电压不高于 0.9 p.u. 的负荷节点总数。这 M 个切负荷节点的切负荷量由式(15)计算得到:

$$\Delta P_k = \frac{Y_k}{\sum_{k=1}^M Y_k} \Delta P \quad k=1,2,\dots,M \quad (15)$$

其中, k 为各负荷节点序号; ΔP_k 为第 k 个负荷节点的切负荷量; Y_k 为第 k 个负荷节点在扰动后 0.5 s 的 Y 指标。

式(14)和(15)给出了切负荷地点选择和切负荷量计算的方法,即本文所提出的自适应减载方案。该方案选择电压跌落严重的节点进行负荷切除,并按照切负荷量分配指标(Y 指标)的大小分配各节点的切负荷量,充分考虑了负荷电压的时空分布特性,能同时保障系统在严重故障下的暂态电压稳定性和频率稳定性。

3 算例仿真分析

3.1 失稳场景 1

图 2 为 IEEE 39 节点系统,系统各负荷节点所采用模型由感应电动机磁暂态模型、恒阻抗模型、恒电流模型与恒功率模型并联构成,仿真在电力系统分析综合程序 PSASP(Power System Analysis Software Package)上进行。失稳场景为 31 号机组在 0.5 s 时故障跳开,损失有功 520 MW,并且 6-11 和 4-14 这 2 条输电线路同时跳闸。如图 3 所示(图中电压为标幺值),该扰动将造成大面积电压崩溃,并且由于电压快

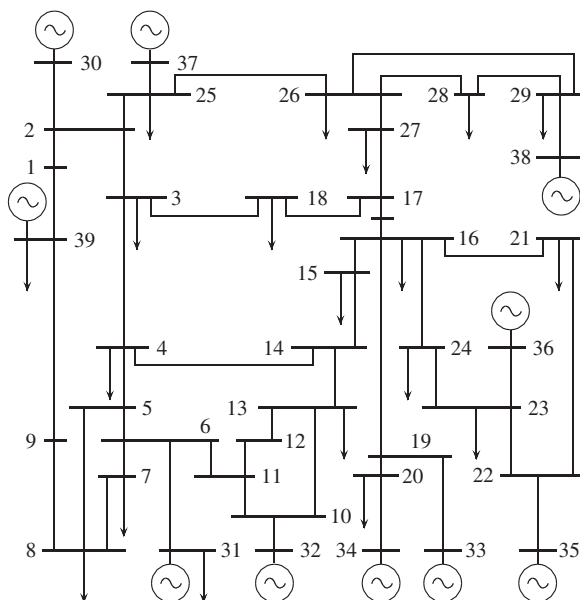


图 2 IEEE 39 节点系统
Fig.2 IEEE 39-bus system

速跌落导致感应电动机发生堵转,负荷有功功率迅速减少,使得系统各机组频率升高至 50.4 Hz,且振荡过程中最高机组频率超过 50.6 Hz(如图 4 所示)。

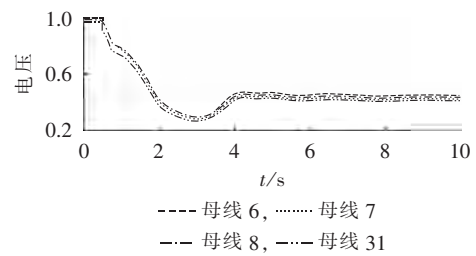


图 3 负荷电压
Fig.3 Load voltage

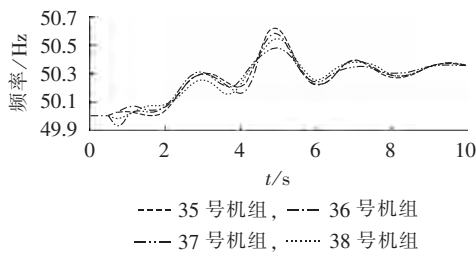


图 4 发电机频率
Fig.4 Generator frequency

3.2 Y 指标分析

表 1 为该失稳场景下故障后 1 s 时,母线 8 连接不同负荷模型时该节点负荷的电压偏移量(标么值)、无功增量(标么值)及相应的 Y 指标大小。

表 1 不同负荷模型的 Y 指标对比
Table 1 Comparison of index Y among different load models

负荷模型	电压偏移量	无功增量	Y 指标
感应电动机	-0.3819	0.4048	3.9650
恒功率负荷	-0.3628	0	2.6154
恒电流负荷	-0.2699	-0.4768	1.5637
恒阻抗负荷	-0.2207	-0.6936	0

如表 1 所示,对 4 种负荷模型进行比较可得如下结论。

a. 恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷以及感应电动机负荷的电压偏移量绝对值依次增大,吸收的无功功率也依次增大,即不同负荷模型对电压稳定性的影响不同,感应电动机对电压稳定性影响最大,恒功率负荷次之,恒阻抗负荷对电压稳定性影响最小。

b. 4 种负荷模型的电压偏移量虽有差别但并不十分明显,而本文所提出的 Y 指标则可以明显区分出不同的负荷模型;从表 1 中可以看出,发生扰动时,感应电动机由于无功的增加,其对应的 Y 指标要明显高于恒功率负荷和恒电流负荷,而对电压稳定性影响最小的恒阻抗负荷,其对应 Y 指标在扰动过程中始终为 0。

图 5 为表 1 所对应的不同负荷模型的 Y 指标变化曲线,易看出,故障后 Y 指标变化迅速,不同负荷

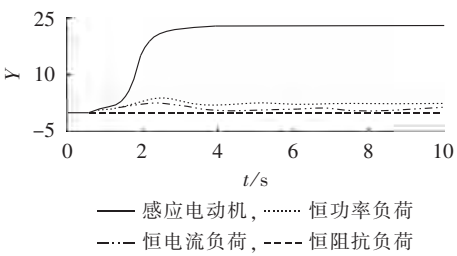


图 5 故障后不同负荷模型的 Y 指标变化
Fig.5 Variation of index Y after fault for different load models

模型的 Y 指标变化过程相差较大,Y 指标大小不仅能反映不同负荷模型对电压失稳的影响程度,还能反映各节点负荷中感应电动机所占比例。因此,通过比较故障后各节点负荷 Y 指标大小则可快速筛选出对电压稳定性影响较大的负荷并对其进行控制。

3.3 减载效果对比

将本文的基于 Y 指标的自适应减载方案与按照负荷电压偏移量 ΔU 分配切负荷量的经典自适应减载方案进行比较。表 2 为 4 种减载方案的对比。表中,方案 1 为本文的自适应减载方案,即在负荷电压不高于 0.9 p.u. 的节点按照 Y 指标分配切负荷量;方案 2 在全网各节点按照 Y 指标分配切负荷量;方案 3 在负荷电压不高于 0.9 p.u. 的节点按照 ΔU 大小分配切负荷量;方案 4 为经典自适应减载方案,即在全网各负荷节点按照 ΔU 大小分配切负荷量; ΔU_j 为第 j 个负荷节点的母线电压偏移量。4 种方案均在扰动发生后 0.5 s 进行切负荷。图 6—8 为 4 种减载方案的控制效果对比图(图中电压均为标么值)。

表 2 4 种减载方案
Table 2 Four load shedding schemes

方案	所需响应信息	切负荷量	切负荷地点
1	频率、电压、无功功率	$\Delta P_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^M Y_j} \Delta P$	局部区域
2	频率、电压、无功功率	$\Delta P_j = \frac{Y_j}{\sum_{j=1}^M Y_j} \Delta P$	全网
3	频率、电压	$\Delta P_j = \frac{\Delta U_j}{\sum_{j=1}^M \Delta U_j} \Delta P$	局部区域
4	频率、电压	$\Delta P_j = \frac{\Delta U_j}{\sum_{j=1}^N \Delta U_j} \Delta P$	全网

由 4 种方案的对比结果可以看出,利用本文 Y 指标的切负荷方案(方案 1 和 2),其减载结果要优于利用负荷电压偏移量 ΔU 的切负荷方案(方案 3 和 4);局部切负荷方案要优于全网切负荷方案(方案 1 优于方案 2,方案 3 优于方案 4)。

若采用方案 4(经典控制方案),则减载后全网平均负荷电压比故障前下降约 10%,而且局部地区

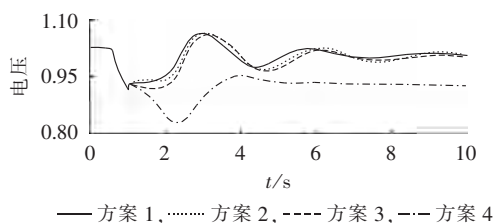


图 6 减载后系统平均负荷电压

Fig.6 Average load voltage after load shedding

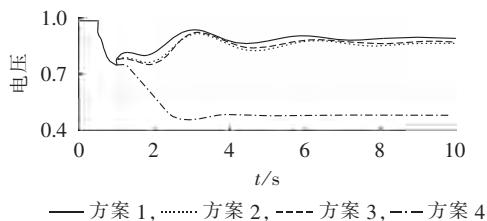


图 7 减载后母线 31 电压

Fig.7 Voltage of bus 31 after load shedding

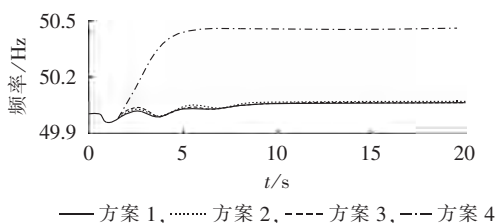


图 8 减载后系统等效惯性中心频率

Fig.8 Frequency of equivalent inertia center after load shedding

仍会出现暂态电压失稳,其中负荷母线 31 的电压为全网最低电压,在故障后 2 s 内跌落至 0.5 p.u.以下,另外,系统等效惯性中心频率将升高至 50.45 Hz,超出了系统正常运行所能接受的频率最高值。

方案 1、2、3 均能保障系统的暂态电压稳定性和频率稳定性。其中,方案 2(利用本文 Y 指标的全网切负荷方案)与方案 3(利用 ΔU 的局部切负荷方案)效果相近,说明利用 Y 指标即使是在全网进行切负荷量分配,其减载效果也优于利用负荷电压偏移量在局部区域进行切负荷的方案,表明 Y 指标在反映负荷电压稳定性方面优于 ΔU 指标。

另外,方案 1(本文的自适应减载方案)具有最佳的减载效果,减载后全网平均电压能够迅速恢复到 1.0 p.u.,负荷母线 31 的电压即全网最低电压能迅速恢复至接近 0.9 p.u.,并且系统等效惯性中心频率波动在 ± 0.05 Hz 范围内。

3.4 失稳场景 2

失稳场景为 39 号发电机在 0.5 s 时故障跳闸,损失有功出力 1 000 MW,该故障将导致发电机频率降低和全网大面积电压崩溃,而且由于电压的跌落使得频率在短时下降后迅速升高至 50.5 Hz 以上。采用如表 2 所示 4 种减载方案进行切负荷控制,本文的自适

应减载方案仍具有最佳的减载效果,减载后全网平均电压能够迅速恢复到额定值,且频率偏移量最小。此处限于文章篇幅,故不再赘述。

4 结论

本文从感应电动机一阶等效模型出发,推导了计及负荷无功变化和电压偏移程度的切负荷量分配新指标,该指标从物理意义上看相当于负荷等效电纳变化量,在故障后该指标增长迅速,指标大小不仅能衡量不同负荷模型对暂态电压失稳的影响程度,同时还能反映该节点负荷中感应电动机所占比例大小。本文利用该指标分配各节点的切负荷量,构建了综合考虑系统频率、负荷电压和无功响应的自适应减载方案。相较于经典的自适应控制方案,本文所提出方案更能够有效地防止频率失稳和暂态电压崩溃,从而保障系统在大扰动下的频率稳定性和暂态电压稳定性。

参考文献:

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackout:part III optimization and coordination of defense lines[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(3):1-10.
- [2] 顿敦,许先华,吴兆国. 电力稳定控制系统低频低压减载的最优策略实现[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):28-30.
DUN Dun,XU Xianhua,WU Zhaoguo. Realization of optimal strategy for power system low-frequency and low-voltage load reduction[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(4):28-30.
- [3] 孙华东,汤涌,马世英. 电力系统稳定的定义与分类评述[J]. 电网技术,2006,30(17):31-35.
SUN Huadong,TANG Yong,MA Shiyong. A commentary on definition and discussion of power system stability[J]. Power System Technology,2006,30(17):31-35.
- [4] 宋兆欧,刘俊勇,刘友波,等. 计及动态修正的自适应广域低频减载[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):95-100,119.
SONG Zhaoou,LIU Junyong,LIU Youbo,et al. WAMS-based adaptive UFLS considering dynamic correction[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):95-100,119.
- [5] 傅旭,王锡凡,杜正春. 电力系统电压稳定性研究现状及展望[J]. 电力自动化设备,2005,25(2):1-9.
FU Xu,WANG Xifan,DU Zhengchun. Voltage stability study status and prospects in power systems[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(2):1-9.
- [6] de la REE J,CENTENO V,THOP J S,et al. Synchronized phasor measurement applications in power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,1(1):20-27.
- [7] GLAVIC M,van THIERRY T. Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1408-1416.
- [8] PRASETIJO D,LACHS W R,SUTANTO D. A new load shedding scheme for limiting underfrequency[J]. IEEE Transactions on

- Power Systems, 1994, 9(3):1371-1378.
- [9] SEETHALEKSHMI K, SINGH S N, SRIVASTAVA S C. WAMS assisted frequency and voltage stability based adaptive load shedding[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]: IEEE, 2009: 1-8.
- [10] SEETHALEKSHMI K, SINGH S N, SRIVASTAVA S C. A synchro-phasor assisted frequency and voltage stability based load shedding scheme for self-healing of power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 221-230.
- [11] TANG Junjie, LIU Junqi, FERDINANDA P, et al. Adaptive load shedding based on combined frequency and voltage stability assessment using synchrophasor measurements[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 2035-2047.
- [12] BALANATHAN R. Influence of induction motor modeling for undervoltage load shedding studies[J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2002, 2: 1346-1351.
- [13] 赵兵, 汤涌. 感应电动机负荷的动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 71-77.
- ZHAO Bing, TANG Yong. Dynamic character analysis of the induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 71-77.
- [14] 徐泰山, 薛禹胜, 韩祯祥. 感应电动机暂态电压失稳的定量分析[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(6): 12-15.
- XU Taishan, XUE Yusheng, HAN Zhenxiang. Quantitative analysis of the induction motor transient voltage instability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(6): 12-15.
- [15] 任先成, 薛禹胜, 丁明, 等. 低频低压切负荷的控制负效应及其机理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 1-5.
- REN Xiancheng, XUE Yusheng, DING Ming, et al. Negative control effects of UFLS and UVLS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 1-5.
- [16] 林舜江, 李欣然, 刘杨华, 等. 考虑负荷动态模型的暂态电压稳定快速判断方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 14-20.
- LIN Shunjiang, LI Xinran, LIU Yanghua, et al. Method for transient voltage stability quick judgment considering load dynamic model[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 14-20.
- [17] 鞠平. 电力系统负荷建模理论与实践[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(19): 1-7.
- JU Ping. Theory and practice of load modeling in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 1-7.
- [18] 贺仁睦, 韩冬, 杨琳. 负荷模型对电网安全性的影响研究[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 1-5.
- HE Renmu, HAN Dong, YANG Lin. Study on effect of load models on power system security[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 1-5.
- [19] 王义红, 张雪敏, 孙玉娇, 等. 含感应电动机的独立电力系统暂态电压分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2011, 51(1): 36-42.
- WANG Yihong, ZHANG Xuemin, SUN Yujiao, et al. Transient voltage stability of independent electric power systems with induction motors[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(1): 36-42.

作者简介:



李 晔

李 晔(1990—), 男, 广东梅州人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统频率及电压稳定控制(E-mail: 236022416@qq.com);

张保会(1953—), 男, 河北魏县人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统继电保护、安全稳定控制和电力系统通信等(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn)。

Load shedding scheme optimization based on load voltage and reactive power

LI Ye, ZHANG Baohui

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An index of shedding load allocation considering the reactive power variation and voltage deviation of nodal load is deduced based on the first-order model of induction motor, which denotes physically the equivalent susceptance change of nodal load, reflecting the proportion of induction motor in the nodal load and the influence of load model on the transient voltage stability. It is used to allocate the shedding load to each node and an adaptive load shedding scheme considering the system frequency, load voltage and reactive power response is proposed. The simulative results of IEEE 39-bus system show that, compared with the classical adaptive load shedding scheme, the proposed scheme can better guarantee the voltage and frequency stability of power system after big disturbance.

Key words: electric power systems; transient voltage stability; frequency stability; adaptive control; load shedding; stability