

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230624

弱联工业企业电网两阶段紧急控制方法

聂陆燕, 刘福锁, 郝朝辉, 任建锋, 李威

(南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要: 工业企业电网负荷具有感应电动机占比高和功率因数低的特点, 当同主网唯一的联络通道故障断开时, 工业企业电网失稳风险突出, 给紧急控制带来严峻挑战。首先, 从网架、负荷和技术人员需求等方面阐述了工业企业电网的特点。并基于选用的负荷仿真模型, 分析了短路故障下工业企业电网的电压频率耦合特性以及传统紧急控制措施的适应性。其次, 针对故障后需要避免暂态低压高频和稳态过压低频的紧急控制需求, 研究了考虑设备保护和系统保护并行动作, 以及电气量响应驱动的应对策略, 提出了工业企业电网两阶段紧急控制方法。最后, 基于某实际工业企业电网验证了所提方法的可行性和有效性, 表明通过优化控制时机可协调暂态低压快速恢复和稳态过电压的矛盾。

关键词: 低压高频; 过压低频; 感应电动机; 功率因数; 紧急控制

Two-stage emergency control method for a weakly connected industrial enterprise power grid

NIE Luyan, LIU Fusuo, QIE Zhaohui, REN Jianfeng, LI Wei

(NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: The load of an industrial enterprise power grid is characterized by a high proportion of induction motors and low power factor. When the only connection channel with the main network fails and disconnects, the risk of instability is prominent, posing a serious challenge to emergency control. First, the characteristics of industrial enterprise power grids are elaborated from the perspectives of grid structure, load, and technician requirements. Based on the selected load simulation model, the voltage frequency coupling characteristics of the grid in short-circuit faults and the adaptability of traditional emergency control measures are analyzed. Second, in response to the emergency control needs of avoiding transient undervoltage over frequency and steady-state overvoltage under frequency after faults, a response strategy considering parallel actions of equipment protection and system protection, as well as electrical response driven is studied. Then, a two-stage emergency control method for such grids is proposed. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified based on an actual industrial enterprise power grid, indicating that optimizing the control timing can deal with the contradiction between rapid recovery of transient undervoltage and steady-state overvoltage.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. U2066210).

Key words: undervoltage and over frequency; overvoltage and under frequency; induction motor; power factor; emergency control

0 引言

工业企业电网通常通过单回线路或同杆并架双回线路与大电网的边缘弱联接, 受制于网架薄弱或气候、地质恶劣等条件, 联络通道故障断开将导致工业企业电网孤网运行, 失稳风险突出^[1-5]。通常配

置紧急控制系统^[6-8], 来保障联络通道故障下电网的安全稳定运行。“双碳”背景下, 工业企业电网更倾向通过内部新能源大发或从大电网受电来提高经济效益。由于工业企业电网网架薄弱, 动态电压支撑能力不足, 加之感应电动机负荷高占比, 在大功率受电方式下, 若联络通道发生故障断开, 电网往往同时存在电压和频率失稳风险。仅采取联切负荷的控制措施, 易出现暂态低压高频和稳态过压低频等电压

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U2066210)

频率耦合问题, 给传统紧急控制带来严重挑战^[9-10]。

感应电动机动态特性是暂态电压失稳的主要诱因, 其机理已被多方面论证^[11-14]。工业企业电网呈现感应电动机占比高和功率因数低的特点, 网内负荷跟随电压波动进而影响系统频率, 易产生电压频率耦合现象。对存在有功功率缺额的孤岛系统, 初始无功功率缺额和感应电动机比例分别通过影响孤岛电压水平和电压动态过程, 进而影响孤岛频率响应特性^[15-16]。文献[17]介绍了切负荷控制对暂态频率和电压安全造成的负效应现象, 其本质是负荷电压特性对频率恢复产生负影响, 在仅考虑综合静态负荷模型的情况下, 提出用切负荷实效量来表征切负荷控制正反两方面影响的综合效应。文献[18-19]提出在低频减载切负荷过程中计及电压频率交互影响和时空分布特性。针对电压频率强耦合场景下的安全稳定控制, 大电网多通过控制断面限额、限制新能源上网量等预防控制手段, 或通过增强电网动态无功配置来解决该问题。而企业电网基础设施薄弱, 紧急控制是其主要手段, 如何制定完善的紧急控制策略来解决该问题, 还缺乏深入的研究。

紧急控制是在故障发生后, 为防止系统稳定破坏而进行的前馈控制^[20]。针对预想的故障形态, 事先制定离线或在线紧急控制策略表, 一旦监测到预想故障发生, 按照既定的控制策略表实施切机、切负荷等控制措施, 保证故障后电网的安全稳定运行。传统紧急控制通常在监测到故障, 并判断继电保护跳开故障线路后, 执行紧急控制。也就是设备保护(也被称为继电保护)和系统保护(也被称为紧急控制)采用串行的工作模式, 整个流程耗时约 160 ms^[21], 牺牲了紧急控制的快速性。针对此问题, 文献[22]提出了设备保护和系统保护并行工作机制, 监测到故障后, 紧急控制无须等到继电保护动作, 立即采取切机、切负荷等控制措施。

本文针对电压频率强耦合对工业企业电网紧急控制带来的挑战, 探索系统保护和设备保护并行机制在工业企业电网紧急控制中的应用, 应对暂态低压高频问题引发的连锁反应。提出融合电压响应轨迹驱动的两阶段紧急控制思路, 解决故障后暂态电压快速恢复和避免稳态过电压这一互相矛盾的控制需求。最后介绍了该方法在某实际工业企业电网的应用案例, 以期为应对电压频率强耦合场景的紧急控制提供借鉴。

1 工业企业电网特征

1.1 网架薄弱

工业企业电网一般通过 220 kV/330 kV 电压等

级的单回线路或者同杆并架双回线路与大电网边缘弱联接, 内部通常采用链式或单回环型结构。出于经济考虑, 网内同步机组惯量偏小, 有功功率、无功功率调节能力相当有限, 且缺乏足够的动态无功补偿设备。

图 1 为某工业企业电网, 通过 220 kV 同杆双回线与大电网相连, 受电能力为 400 MW。网内有 A 火电厂(G1, 350 MW)、B 火电厂(G2、G3, 2×350 MW)、C 水电站(G4、G5, 2×50 MW)、光伏及风机共 210 MW 的新能源装机。该电网以受电为主, 网内火电机组开机通常控制在 2 台以内。

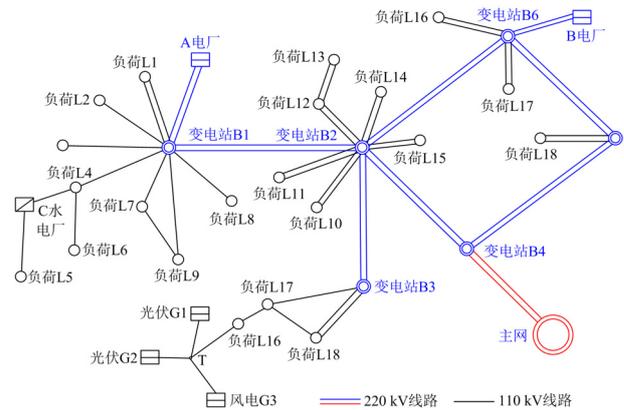


图 1 工业企业电网的典型网架结构

Fig. 1 Typical grid structure of industrial enterprise power grid

1.2 负荷特点

工业企业电网负荷多为高耗能负载, 根据负荷特性, 可分为高电动机占比类负荷(如钢铁、水泥等行业负荷, 电动机占比高达 90%)和低功率因数类负荷(如铁合金、电解铝等负荷, 补偿前功率因数一般低于 0.85), 如表 1 所示。

表 1 工业企业电网不同类型负荷特点

Table 1 Characteristics of different types of load in industrial enterprise power grid

负荷类型	种类	电动机占比	功率因数
电动机高占比	炼钢	90%	小于 0.90
	水泥	90%	小于 0.90
低功率因数	铁合金	15%	0.7~0.8
	电解铝	5%~10%	小于 0.85

1.2.1 电动机高占比负荷

炼钢类负荷为典型的电动机高占比负荷。在整个工艺流程中, 含有大量的磨机、辊压机、鼓风/排风/抽风/引风机、水泵、轧机等电动机负荷, 约占整个工艺流程负荷的 90%。

水泥行业生产的是硅酸盐水泥, 有生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨三个生产阶段。水泥厂的装备

几乎均为电机拖动(破碎机、立磨、球磨、篦冷机、辊压机、水泥磨等),电动机负荷占比约为90%。

1.2.2 低功率因数负荷

铁合金生产过程是将合金氧化物炉料、还原剂、渣料和成分调节剂在高温下经过物理、化学变化生成铁合金、炉渣、炉气的过程。电炉法是铁合金冶炼的主要方法,其产量占全部铁合金产量的70%以上,用碳作还原剂生产铁合金的电炉,常称为矿石还原炉或矿热炉。矿热炉的综合阻抗由电炉变压器、电炉短网和炉内阻抗三部分组成。矿热炉的自然功率因数为0.7~0.8,一般会对投运的冶炼炉配置相对应的低压侧无功补偿。工艺中的电动机负荷局限于循环水、鼓风机等动力系统,占比一般不超过15%。

电解铝负荷也是典型的低功率因数型工业负荷。通常采用预焙阳极铝电解槽,以碳素体作为阳极,铝液作为阴极,在950~970℃的电解温度下通入直流电对冰晶石-氧化铝熔液进行电解。大型电解铝厂一级负荷占全厂总负荷的95%以上,主要包括电解铝系列负荷和空压、循环水、循环风等动力负荷,电动机占比一般为5%~10%。功率因数一般低于0.85,补偿后功率因数在0.96左右。

1.3 追求经济利益最大化

不同于大电网将安全稳定始终放在第一位,紧急控制采取切负荷措施时主要追求控制效果而较少考虑切除负荷带来的损失。在工业企业电网中,负荷的正常生产才能带来经济效益,追求电网安全的同时,如何少切除负荷也是工业企业电网保障利益最优的一个重要需求。同时,工业企业电网基础设施配置较为薄弱,运行人员专业技术能力偏低,更希望通过紧急控制系统解决现有的安全稳定问题。

2 电压频率特性及紧急控制挑战

2.1 故障下的电压频率特性

电动机负荷高占比是联络线故障开断后系统电压失稳的主要原因^[23]。短路故障下,感应电动机吸收的无功功率 Q 表示为

$$Q = \frac{U^2}{X_m} + \frac{U^2(X_1 + X_2)}{(R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2} \quad (1)$$

式中: U 为端电压; X_1 为电动机定子漏抗; X_2 为电动机转子漏抗; R_2 为电动机转子电阻; X_m 为电动机励磁电抗; s 为电动机转差率。

表2为以标幺值表示的电动机典型参数^[24],将其代入式(1)易得:短路故障后,系统电压跌落, s 增大,感应电动机负荷的无功需求逐步增加,造成暂

态电压恢复缓慢或者失稳。

表2 通用感应电动机参数

Table 2 General induction motor parameters

类型说明	$X_1/p.u.$	$X_2/p.u.$	$X_m/p.u.$	$R_2/p.u.$	s
感应电动机	0.18	0.12	3.5	0.02	0.016

联络通道故障开断后,工业企业电网将孤网运行,孤网系统频率特性可由式(2)描述。

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e = \Delta P \quad (2)$$

式中: M 为系统等值惯量; ω 为转子转速; P_m 为等值机械功率; P_e 为等值电磁功率。在不考虑电压影响的条件下,针对特定的场景,系统频率特性主要取决于故障导致的功率不平衡量 ΔP 。由于工业企业电网缺乏无功电压动态支撑能力,联络通道短路故障下通常伴随暂态低电压问题。此时的 ΔP 则由发电机等值机械出力 P_m 和负荷吸收的等值电磁功率 P_e 共同决定。工业企业电网的负荷可用式(3)描述。

$$P_e = P_0 \left[a_p \left(\frac{U}{U_0} \right)^2 + b_p \left(\frac{U}{U_0} \right) + c_p \right] + \frac{U^2}{(R_2/s)^2 + (X_1 + X_2)^2} \times \frac{R_2}{s} \quad (3)$$

式中: P_0 为静态负荷初始值; U_0 为电压初始值; a_p 、 b_p 、 c_p 分别为恒阻抗负荷、恒电流负荷、恒功率负荷的有功分量占比;第二项为感应电动机负荷吸收的有功功率。当联络通道短路故障开断,孤网系统出现暂态低电压时,高占比的感应电动机转差率增大,从系统加速吸收无功功率进一步减缓暂态电压恢复, P_e 大幅降低,而 P_m 调节空间有限且不能突变,孤网系统暂态有功功率盈余进而出现高频问题。

如图1所示的工业企业电网,在A厂火电开机1台,在新能源出力110MW的枯水期方式下,总负荷为570MW(水泥负荷为160MW、铁合金负荷为210MW、炼钢负荷为100MW、电解铝负荷为100MW),经联络通道从主网受电200MW。联络通道发生三相短路故障后,工业企业电网进入孤网运行。故障下的电压频率曲线如图2所示。由于工业企业电网感应电动机占比高,系统暂态电压恢复缓慢,其值持续低于0.75 p.u.,孤网内火电机组转子持续加速,呈现低压高频特征。

2.2 传统紧急控制措施的适应性

工业企业电网内火电机组开机台数少,一次调频能力极为有限,考虑到暂态电压恢复至合理运行范围后,联络通道故障前的交换功率将成为工业企

业电网新的功率不平衡量, 因此, 紧急控制通常按照与故障前的功率缺额相匹配的原则来确定切负荷量。

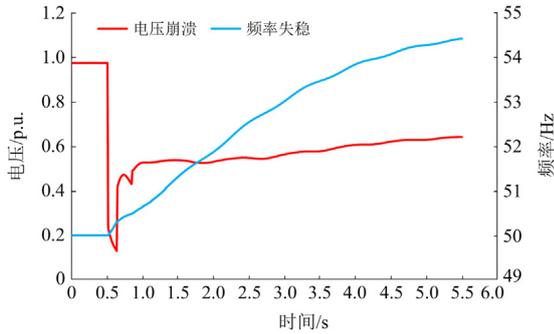
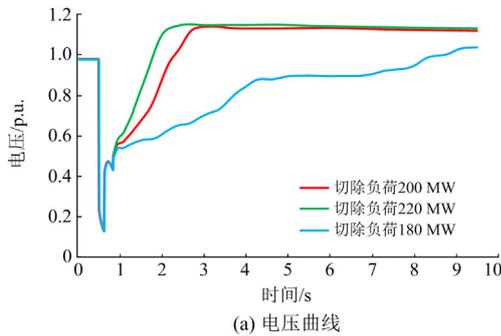


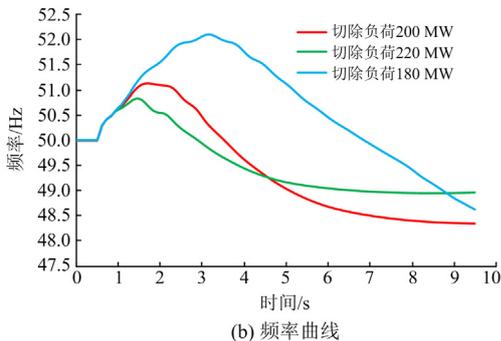
图2 联络通道短路故障下的电压频率曲线

Fig. 2 Voltage and frequency curve under short-circuit fault of connection channel

以图2所示的典型故障场景为例, 联络线路三相短路故障后 0.12 s 继电保护断开联络通道, 紧急控制按照与断面受入功率相匹配的原则, 在故障后 0.32 s 采取切负荷措施。分别考虑切除负荷 180 MW (欠切 20 MW)、200 MW(等量切除)、220 MW(过切 20 MW)后的电压频率曲线如图3所示。



(a) 电压曲线



(b) 频率曲线

图3 故障下切除不同负荷后的电压、频率曲线

Fig. 3 Voltage and frequency curve after cutting off different loads under fault

1) 考虑欠切负荷 20 MW, 孤网电压恢复较慢, 9 s 恢复至 1 p.u.附近。在暂态过程中, 由于电压频

率耦合, 系统频率最大升高至 52.10 Hz, 频率稳定值低于 49 Hz, 易导致高频切机和低频减载动作, 引发连锁反应。

2) 采取等量切负荷策略, 孤网电压可快速恢复, 但造成稳态电压过高, 达到 1.12 p.u., 孤网系统暂态频率最高可至 51.14 Hz, 稳态频率为 48.35 Hz。

3) 考虑过切负荷 20 MW, 孤网电压恢复最快, 暂态电压低于 0.75 p.u.的持续时间为 0.86 s, 但稳态过电压达到 1.14 p.u.。孤网系统暂态频率最高可至 50.85 Hz, 稳定在 48.96 Hz。

可见, 过切负荷有利于暂态电压快速恢复, 但却会加重稳态过压。为了补偿低功率因数负荷的无功需求, 工业企业电网通常在负荷端或上级变电站配置相应的电容器组。负荷被切除后, 大量电容器组仍挂网运行, 在系统暂态电压恢复后将进一步抬高系统稳态电压。加之紧急控制切除大量负荷后, 工业企业电网潮流减轻, 线路及主变损耗有所减小, 会进一步加重系统稳态过电压。由式(3)可知, 工业企业电网留网负荷大小^[17]与系统电压密切相关, 随着电压升高, 留网负荷量增大。而工业企业电网孤网运行时内部火电机组一次调频能力极为有限, 过切负荷虽有利于暂态电压恢复, 但也容易加重稳态过压引起留网负荷量增加, 造成孤网系统低频, 进而导致过切负荷量难以定量给出。另外, 工业企业电网追求经济效益, 也希望负荷切除量尽可能少。因此, 传统紧急控制措施难以有效解决该问题。

2.3 紧急控制面临的挑战

工业企业电网故障下的低压高频问题, 以及切除部分负荷后的高压低频问题, 本质上都是由电压频率耦合引起的。网内负荷吸收的有功功率随系统电压变化, 转而影响系统频率变化^[18-19]。紧急控制既要保证暂态电压快速恢复, 又要避免稳态过电压的控制需求, 两者相互矛盾, 又存在因果关联性。

紧急控制措施的核心要素包括控制时刻、控制对象和控制量。对于大功率受入的工业企业电网, 针对联络断面故障开断后的电压失稳或暂态低压问题, 紧急控制通常优先切除感应电动机负荷, 选取更大的控制量和更短的控制延时均可加快系统暂态电压的恢复。但是过切负荷后, 由于潮流轻载和挂网无功补偿设备过多, 必然会进一步加重稳态过电压, 引起留网负荷增大, 弱化紧急控制效果。扰动、控制和恢复的过程中电压频率均出现耦合, 对于一次调频能力非常有限的孤网系统来说, 系统频率将更加难以控制。只能寻求通过更短的控制时间来加快暂态电压、频率恢复。

稳态过电压的原因主要是大量负荷被切除后的潮流轻载，以及电容器组提供的感性无功功率过剩。在暂态电压跌落阶段，电容器组提供的无功功率虽然随着电压的平方相应减小，但面对感应电动机负荷吸收的无功功率逐步增大而孤网系统无功功率愈发不足的局面，电容器组提供的感性无功功率至关重要。若和负荷同步切除，会使系统暂态电压恢复变慢，甚至造成电压失稳。因此，如何协调电容器组的切除时序是工业企业电网紧急控制需要解决的一个问题。

3 两阶段紧急控制方法

针对弱联工业企业电网联络断面短路故障断开后，暂态电压快速恢复和防止稳态过电压的控制需求，本文提出了设备保护和系统保护并行动作机制，以及融合电压响应轨迹驱动的两阶段紧急控制方法。

3.1 设备保护和系统保护并行动作机制

传统紧急控制判断联络断面故障断开，是通过采集双侧开关位置信号结合线路电气量有效值的突变信息(电流、功率等)实现的。短路故障发生一断

路器动作完成—紧急控制装置判断出线路跳闸—发出相应的控制措施到执行站—控制措施执行完成，整个流程常规耗时约 160 ms。若能将紧急控制动作时间提前，缩短时间流程，可大幅加快暂态电压恢复，减小高频风险，提升紧急控制切负荷措施的控制效果。

根据文献[22]提出的系统保护和设备保护并行控制理念，制定了如图 4 所示的适用于工业企业电网的系统保护和设备保护并行实施流程。由电气突变量触发，依靠继电保护信号筛选故障类型，结合电气量有效值防误的新动作机制，耗时将缩短为 105 ms。考虑到电压恢复后联络断面的受入功率即是决定孤网系统频率波动的功率不平衡量，因此紧急控制仍按照与功率缺额相匹配的原则确定切负荷量。

与串行机制相比，并行机制即使发生开关拒动，紧急控制系统也会立即执行控制命令。考虑到转入孤网后工业企业电网主要问题为电压频率失稳问题。如果发生开关拒动，也会由后备保护跳开相关线路，进入孤网运行状态，提前切除部分负荷，并不会带来更坏的结果。

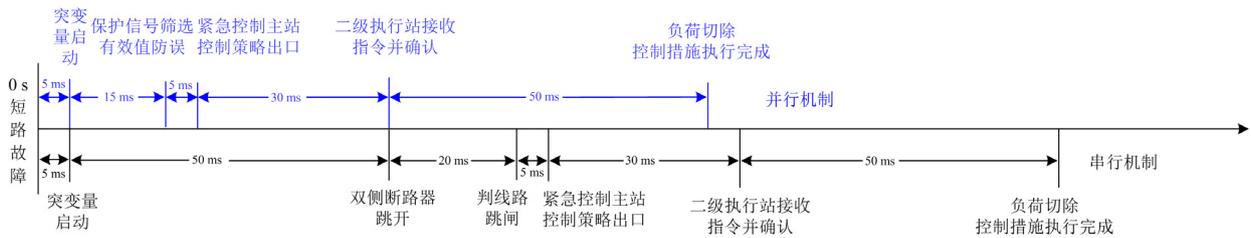


图 4 并行动作和串行动作机制对比

Fig. 4 Comparison of parallel action and serial action mechanisms

3.2 电压响应驱动的紧急控制

可以认为紧急控制采用并行机制后，工业孤网系统暂态电压能够快速恢复。此时制约工业企业孤网系统的主要风险是留网负荷因电压升高产生新的有功功率不平衡而引起的系统低频问题。因此，通过切除电容器组使系统电压尽可能恢复至初始运行值，使得留网负荷的增加量尽可能小，这是此阶段的控制目标。借鉴校正控制由电气量响应驱动的技术特点，在紧急控制一组动作周期的时间窗内，提出基于电压响应轨迹切除部分电容器组的紧急控制方法，降低稳态过电压引发的低频风险。

工业企业电网系统的无功功率平衡可表示为

$$Q_{zl} = Q_{sr} + Q_C + Q_G - Q_{sh} \quad (4)$$

式中： Q_{zl} 为故障前的总无功负荷； Q_{sr} 为经联络线路受入的无功功率； Q_C 为电容器提供的感性无功功率； Q_G 为发电机提供的无功出力； Q_{sh} 为变压器和

线路上的无功损耗。

当联络通道短路故障断开，紧急控制切除无功负荷 Q_{lc} 后，工业孤网系统内感性无功过剩。忽略线路、主变轻载造成的 Q_{sh} 减小量和发电机无功出力变化量，故障后的无功过剩量可表示为 $(Q_{lc} - Q_{sr})$ ，按照控制量 $(Q_{lc} - Q_{sr})$ 切除电容器组，系统过电压现象可消除。参考校正控制基于响应轨迹驱动的特点，采用多轮次逼近的原理，当系统电压恢复至动作定值时切除电容器。理论上，补切电容器动作门槛值越接近初始运行电压，留网负荷的有功增加量越小，频率恢复效果越好。但考虑到过早切除电容器组存在恶化电压的风险，过晚切除则可能引发新能源机组高压脱网，因此，牺牲系统频率的控制精度，以频率恢复至满足频率稳定判据为控制目标，按照电压最大允许偏差^[25]来确定补切电容器组动作定值，选取 1.1 p.u.，延时设为 0.1~0.2 s。为防止单一轮次

切除容量过大造成电压波动过大, 可按照控制量 $(Q_{lc} - Q_{sr})$ 乘以系数 K 来控制, K 可取 0.8 或 0.9。为防止第一轮次动作后, 系统电压长期悬浮在 1.1 p.u. 左右, 同时为了使系统电压尽可能地接近控制目标, 增设特殊轮次, 动作值可取 1.05 p.u. 或 1.07 p.u., 控制量可取 $(1-K)(Q_{lc} - Q_{sr})$, 延时适当放大, 可取 2 s。

选取孤岛系统中枢纽节点作为考察节点, 节点 i 的过电压裕度 η_i 可表示为

$$\eta_i = \frac{U_i - U_{mki}}{U_{i0} - U_{mki}} \quad (5)$$

式中, U_i 、 U_{i0} 、 U_{mki} 分别为该节点故障后的稳态电压、初始运行点电压和可承受的稳态阈值电压。

切除场站 B_j 处的电容器对节点 i 的电压灵敏度 S_i 表示为

$$S_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial Q_{Bj}} \quad (6)$$

式中, Q_{Bj} 为电容器切除容量。

根据式(6)可形成过电压切电容器控制策略表, 如表 3 所示, 场站 B_j 在轮次 N 下的切除容量 Q_{BjN} , N 取 1 或 2。

表 3 切除电容器组的控制策略表

补切电容器门限值/p.u.	延时/s	轮次	切除容量	备注
1.10	0.2	1	Q_{Bj1}	基本轮
1.07	2	2	Q_{Bj2}	特殊轮

3.3 紧急控制两阶段控制流程

目前的紧急控制装置多采用“离线预算、实时匹配”方案。在离线准备决策表时, 用预先指定的运行工况和扰动场景作为决策表的索引。运行中一旦监测到事故, 就按实际工况和事故在决策表的索引进行近似的匹配, 选取对应的控制策略^[20]。

对于弱联工业企业电网联络断面故障开断后的电压频率耦合场景, 需要通过离线仿真计算, 筛选出需要设防的故障集 L , 制定紧急控制切负荷策略表和多轮次补切电容器组策略表。紧急控制系统接入这些关键断面的线路主保护信号, 并实时监测这些场站的电压和并网电容器组等信息。一旦接收到继电保护动作信号, 且满足集合 L , 记下联络通道受入功率 $(P_{sr} + jQ_{sr})$, 按照设备保护和系统保护并行动作机制, 紧急控制以有功控制量 P_{sr} 切除负荷, 记紧急控制所切除的无功负荷量为 Q_{lc} 。同时, 实时判断枢纽节点的电压, 若满足过电压补切电容器轮次动作定值, 按照基本轮次控制量 $K(Q_{lc} - Q_{sr})$

追加补切电容器措施。并在紧急控制的一个整组动作周期内, 实时多轮次判断和采取控制措施, 尽可能地将系统电压控制到初始运行点附近。流程如图 5 所示。

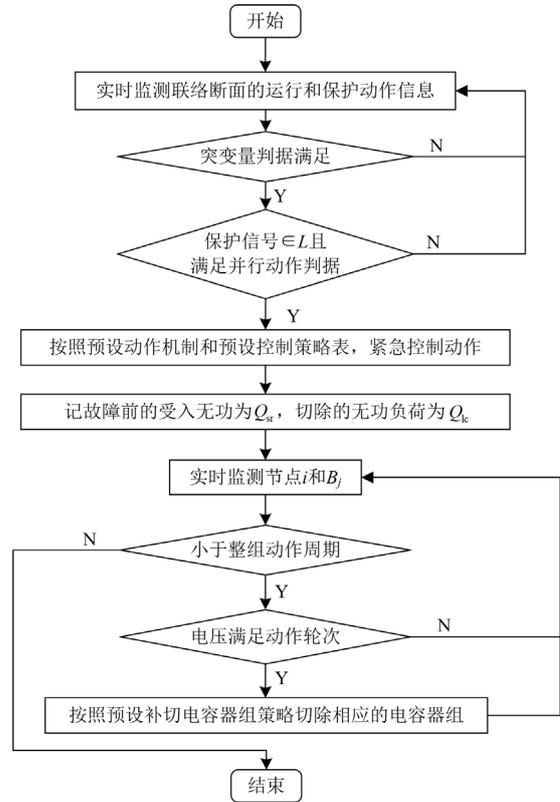


图 5 紧急控制两阶段控制流程图

Fig. 5 Flow chart of two-stage emergency control

4 应用案例

在图 1 的电网和图 2 的典型场景中, 负荷均采用感应电动机+静态负荷的综合负荷模型, 其中水泥厂、钢厂、铁合金负荷感应电动机的平均占比约为 50%, 采用高耗能负荷^[24]模型。其与电解铝模型^[26]的标幺值参数分别如表 4 和表 5 所示。

表 4 高耗能模型的感应电动机模型参数

参数	$R_1/p.u.$	$X_1/p.u.$	$X_m/p.u.$	$R_2/p.u.$	$X_2/p.u.$	T_f/s	占比/%	负载率
高耗能	0.013	0.117	3.72	0.0085	0.117	2.9	50	0.4
电解铝	0.013	0.117	3.7	0.0089	0.117	3.0	10	0.4

表 5 综合静态模型参数

静态参数	Z_P	Z_Q	I_P	I_Q	P_P	P_Q
高耗能	0.05	0.05	0.9	0.9	0.05	0.05
电解铝	0.72	1.32	0.36	-0.44	-0.08	1.12

以任何时刻系统频率不高于 51.0 Hz、不低于 49.0 Hz，且事故后能迅速恢复到 49.5~50.5 Hz 作为频率稳定判据。以暂态和动态过程中系统电压中枢点母线电压下降持续低于限定值(0.75 p.u., 1 s)，且动态过程平息后 220 kV 及以上电压等级中枢点母线电压不低于 0.9 p.u.作为电压稳定判据。

工业企业电网受入 200 MW 时，联络通道三相短路开断，采用设备保护和系统保护并行工作机制，紧急控制在故障后 0.23 s 切除高耗能负荷 200 MW，在系统电压恢复至 1.1 p.u.后，延时 0.1 s 切除无功补偿共 60 Mvar，暂态电压低于 0.75 p.u.持续时间为 0.7 s，稳定在 1.04 p.u.，系统暂态频率最高至 50.51 Hz，稳定在 49.68 Hz。

分别选取并行机制下紧急控制切除 200 MW 负荷，同时联切 60 Mvar 的无功补偿作为对照措施一；串行机制下切除 200 MW 负荷，当稳态电压恢复至 1.1 p.u.后，延时 0.1 s 切除 60 Mvar 的无功补偿作为对照措施二。频率和电压曲线分别如图 6 和图 7 所示。

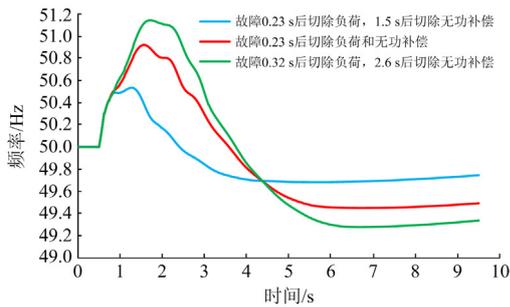


图 6 两阶段紧急控制下的频率曲线

Fig. 6 Frequency curve under two-stage emergency control

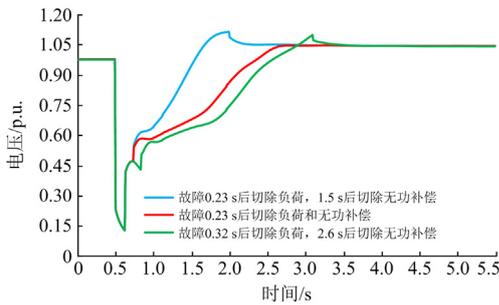


图 7 两阶段紧急控制下的电压曲线

Fig. 7 Voltage curve under two-stage emergency control

对照措施一的并行机制下，紧急控制在故障发生后 0.23 s 同步联切无功补偿，暂态电压低于 0.75 p.u.的持续时间为 1.25 s，暂态最高频率为 50.92 Hz，稳定在 49.5 Hz，暂态电压不安全。对于感应电动机高占比的工业企业电网，即使考虑设备

保护和系统保护并行机制，紧急控制同步切除无功补偿，也会加重系统暂态电压跌落。

对照措施二的串行机制下，紧急控制在故障发生后 0.32 s 切除负荷 200 MW，暂态电压低于 0.75 p.u.的持续时间为 1.5 s，暂态频率最高可达 51.14 Hz。紧急控制在 2.6 s 后切除无功补偿，电压稳定在 1.04 p.u.，频率最低为 49.28 Hz，稳定在 49.5 Hz，暂态电压不安全。可以得出，暂态电压恢复之后及时补切电容器组解决了稳态过压低频的问题，但暂态电压恢复缓慢的现象仍旧存在。

设备保护和系统保护并行机制可缩短紧急控制的动作时长；电压响应驱动切除电容器组，确保在暂态低电压阶段保留电容器组提供的感性无功功率，并延至电压恢复后切除，两阶段动作方法对三相短路故障造成的暂态低压高频和稳态过压低频问题，具有良好的控制效果。

5 结论

本文分析了电压频率强耦合特性对弱联工业企业电网传统紧急控制的影响，提出了综合采用设备保护和系统保护并行、电压响应驱动的两阶段紧急控制方法。主要结论如下：

1) 采用设备保护和系统保护并行动作机制，可快速恢复系统暂态电压，有效应对故障后因感应电动机高占比负荷带来的暂态低压或电压失稳问题，降低由电压频率耦合引发的高频切机等连锁动作风险。

2) 紧急控制在一组动作周期内根据电压实时响应驱动触发补切电容器组的控制策略，可有效解决因大量低功率因数负荷被切除后带来的稳态过压低频问题。同时通过控制时机优化，避免了在切负荷时同步切除电容器导致的暂态电压失稳问题。

本文针对工业企业电网短路故障后电压频率耦合引起的暂态低压高频和稳态过压低频问题，提出的两阶段动作的紧急控制思路，可为其他类似电网提供参考。

参考文献

[1] 张刘杰, 肖仕武, 黄松柏. 基于灵敏度的孤网动态频率偏移峰值分析和调速系统参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 137-143.
ZHANG Liujie, XIAO Shiwu, HUANG Songbai. Dynamic frequency offset peak analysis and speed control system parameter optimization of isolated networks based on sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 137-143.
[2] 陈煌, 黄汉昌, 黎值源, 等. 抽水蓄能机组孤网运行稳

- 定特性分析[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 113-120.
- CHEN Huang, HUANG Hanchang, LI Zhiyuan, et al. Analysis on the stability characteristics of isolated network of the pumped storage unit[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(11): 113-120.
- [3] 刘福锁, 方勇杰, 吴雪莲. 考虑解列后孤网暂态稳定性的解列时刻实时决策方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 83-89.
- LIU Fusuo, FANG Yongjie, WU Xuelian. Real-time decision-making method of splitting time considering transient stability of isolated power grid after splitting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 83-89.
- [4] 方勇杰, 刘福锁, 李威, 等. 解列时刻对解列后孤网暂态稳定性的影响机理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(12): 75-83.
- FANG Yongjie, LIU Fusuo, LI Wei, et al. Influence mechanism of splitting timing on transient stability of isolated power grid after splitting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(12): 75-83.
- [5] 杨再欣, 陶军, 尹柏清, 等. 基于 DIGSILENT 的机网协调控制及动模验证[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 174-179.
- YANG Zaixin, TAO Jun, YIN Baiqing, et al. Generator and power grid coordination control and dynamic test based on DIGSILENT[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 174-179.
- [6] 宋洪磊, 李晓飞, 吴俊勇, 等. 解列后电力孤岛的校正控制策略研究[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 124-130.
- SONG Honglei, LI Xiaofei, WU Junyong, et al. Correction control strategy of islanded power grid after separation[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 124-130.
- [7] PROASETIJO D, LACHS W R, SUTANTO D. A new load shedding scheme for limiting underfrequency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(3): 1371-1381.
- [8] 吴雪莲, 李兆伟, 刘福锁, 等. 大功率扰动下计及系统频率分布特性的紧急控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 104-114.
- WU Xuelian, LI Zhaowei, LIU Fusuo, et al. Analysis of the emergency control strategy of system frequency considering system frequency distribution characteristics under large power disturbance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 104-114.
- [9] 王泽昊, 汪娟娟, 刘岳坤, 等. 考虑频率耦合效应的柔性直流输电高频谐振抑制措施[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 164-173.
- WANG Zehao, WANG Juanjuan, LIU Yuekun, et al. High-frequency resonance suppression measure for MMC-HVDC considering frequency coupling effect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 164-173.
- [10] 周文俊, 曹毅, 李杰, 等. 考虑风电场调控裕度的风火打捆直流外送系统无功电压紧急控制策略[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 77-87.
- ZHOU Wenjun, CAO Yi, LI Jie, et al. Reactive voltage emergency control strategy of wind-thermal-bundled DC transmission system considering wind farm regulation margin[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 77-87.
- [11] 韩祯祥, 徐泰山, 薛禹胜. 暂态电压稳定的模型要求和快速判断[J]. 电力系统自动化, 1995, 19(12): 11-15.
- HAN Zhenxiang, XU Taishan, XUE Yusheng. Modeling requirements and fast judgment of transient voltage stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(12): 11-15.
- [12] 朱瑞金, 董亚丽, 唐波. 基于改进深度森林的暂态电压稳定快速评估[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(6): 24-30, 43.
- ZHU Ruijin, DONG Yali, TANG Bo. Fast assessment of transient voltage stability based on improved deep forest[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 24-30, 43.
- [13] 朱瑞金. 含直流馈入的弱受端电网暂态电压稳定预防控制[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 151-156.
- ZHU Ruijin. Transient voltage stability preventive control for weak receiving-end power grid with HVDC infeed[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 151-156.
- [14] 林莉, 罗皓, 杨仕燕, 等. 基于节点电动机最大自启动量的配电网低压减载[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 77-87.
- LIN Li, LUO Hao, YANG Shiyan, et al. An under voltage load shedding method for distribution network based on maximum self-starting amount configuration of node motor[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 77-87.
- [15] 杨浩, 张保会, 宋云亭, 等. 解列后孤岛频率电压相互作用仿真及机理探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3503-3508.
- YANG Hao, ZHANG Baohui, SONG Yunting, et al. Security and stability characteristics and control strategies for isolated hydropower groups[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3503-3508.
- [16] 阳登辉, 朱明星, 徐斌. 孤网失稳状态下频率和暂态谐波分析方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 27-34.

YANG Denghui, ZHU Mingxing, XU Bin. An analysis method for frequency and transient harmonics of isolated network under instable condition[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 27-34.

[17] 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.

[18] 侯玉强, 方勇杰, 杨卫东, 等. 综合电压频率动态交互影响的自动减负荷控制新方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 24-28.

HOU Yuqiang, FANG Yongjie, YANG Weidong, et al. A new method of automatic load shedding control based on the voltage and frequency dynamics interaction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 24-28.

[19] 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.

[20] 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, 106.

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, 106.

[21] 电力系统安全稳定计算规范: GB/T 40581—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

Calculation specification for power system security and stability: GB/T 40581—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.

[22] 薛禹胜. 关于三道防线及防御框架的思考[R/OL]. 电力系统自动化[2018-04-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ahcz-bKstufTWK8LoRoxlg/>.

[23] 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 for transient voltage instability caused by induction motors[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(6): 12-15.

[24] 汤涌. 电力负荷的数学模型与建模技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[25] 电能质量—供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

Power quality-deviation of supply voltage: GB/T 12325—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[26] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2023-05-26; 修回日期: 2023-08-08

作者简介:

聂陆燕(1986—), 女, 硕士, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: nieluyan@sgepri.sgcc.com.cn

刘福锁(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与优化控制。E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 许威)