

多机系统发电机组强励电压倍数优化配置算法

周云¹, 严正¹, 李乃湖^{1,2}, 曹路³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240;
2. 阿尔斯通电网中国技术中心, 上海 201114; 3. 华东电网有限公司, 上海 200120)

摘要: 提高发电机组的强励电压倍数可以提高多机系统的暂态稳定性, 因此研究了多机系统发电机组强励电压倍数优化配置算法。建立多机系统的单机无穷大母线模型, 定量计算了系统的暂态稳定裕量。分别建立无刷励磁方式和静止励磁方式下, 强励电压倍数对系统暂态稳定裕量的影响模型, 基于影响模型提出多机系统发电机组强励电压倍数优化配置算法。多机系统发生单一故障时, 该算法优先提高暂态稳定边际成本低的机组的强励电压倍数; 多机系统发生多故障时, 该算法优先提高概率暂态稳定边际成本低的机组的强励电压倍数。利用所提算法, 对 IEEE 3 机 9 节点系统和新英格兰系统的强励电压倍数进行了优化配置。仿真结果表明, 在该配置方式下, 系统的暂态稳定性优于其他配置方式。

关键词: 发电机; 强励电压倍数; 励磁; 优化; 暂态; 稳定性; 模型

中图分类号: TM 761+11

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.11.018

0 引言

励磁系统是发电机组的重要组成部分, 性能良好的励磁系统可以提高发电机的可靠性和稳定性^[1]。随着电力二极管和晶闸管技术的日益成熟, 电厂越来越趋向于选用无刷励磁系统和静止励磁系统^[2]。励磁系统强励电压倍数或称顶值电压倍数(以下简称强励倍数), 是励磁顶值电压与额定励磁电压之比, 是励磁系统主要的大干扰性能指标^[3]。静止励磁系统是指励磁电源从发电机机端取得的励磁控制系统, 响应速度快, 但强励能力易受机端电压影响^[4]。和静止励磁系统相比, 无刷励磁系统利用同轴旋转的交流励磁机作为励磁电源, 全部励磁功率取自轴系, 强励能力不受机端电压的影响。

文献[5-6]分析了发电机励磁系统强励功能和作用, 发电机组的强励能力可以在故障后向系统注入动态无功功率, 提高机组的强励倍数可以提高系统的暂态稳定性。文献[7]研究了静止励磁方式励磁系统模型参数对系统暂态稳定性的影响。文献[8]研究了强励对交直流混合输电系统暂态稳定裕度的影响。文献[9]利用扩展等面积法则, 提出了基于广域测量系统的发电机强励控制方案。

单机无穷大等效是一种混合的时域直接方法^[10], 文献[11]研究了系统在 2 种等值方式下的暂态稳定裕度, 为单机无穷大母线 OMIB(One Machine Infinite Bus)等值模型的暂态稳定分析和控制提供了研究基础。文献[12-13]利用 OMIB 等值模型在暂态稳

定约束最优潮流模型中引入严格的暂态稳定判据。文献[14]利用 OMIB 模型研究了计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法。

本文通过建立多机系统的 OMIB 模型^[10,15], 定量计算出多机系统在预设故障下的暂态稳定裕量; 建立并比较了无刷和静止这 2 种主要励磁方式下强励倍数对系统暂态稳定的影响模型; 基于强励倍数对暂态稳定的影响模型提出了多机系统机组强励倍数优化配置算法; 利用 IEEE 3 机 9 节点系统和新英格兰系统的算例验证了算法的有效性和准确性。

1 多机系统的 OMIB 模型

1.1 多机系统的 OMIB 等值

对多机系统进行短时间时域仿真, 仿真过程中对机组功角排序, 最大功角间隔达到某一数值(如 360°)时, 分别定义功角相对超前和滞后的发电机群为临界机群 C 和常规机群 N, 相应地建立系统的 OMIB 等效模型, 具体的等值公式见文献[16]。通过对 OMIB 等效模型的分析计算, 克服了传统时域方法缺少灵敏度和控制信息的缺点^[17], 可以定量计算出比较精确的系统暂态稳定裕量以表征系统的暂态稳定性。

1.2 OMIB 轨迹分类

根据等值, 可以将 OMIB 轨迹分为暂态不稳定、稳定和极限稳定(不稳定)3 种情况, 应注意的是本节仅叙述单摆稳定的情况。

不稳定 OMIB 轨迹如图 1 所示, 图中, P_E 为等效系统电磁功率; P_M 为等效系统机械功率; δ_0 和 δ_d 分别为预设故障发生时刻 t_0 和故障清除时刻 t_{cl} 对应的系统等功角值; A_{dec} 、 A_{acc} 分别为减速面积和加速面

收稿日期: 2013-12-12; 修回日期: 2014-09-03

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目(SGCC-MPLG018-2012)

Project supported by the Key Program of Large Power Grid for SGCC(SGCC-MPLG018-2012)

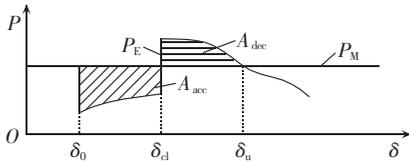


图 1 不稳定 OMIB 轨迹

Fig.1 Unstable OMIB trajectory

积。式(1)为不稳定轨迹的判断条件。其中, P_a 和 ω 分别为等效后的系统加速功率和角速度; t_u 为系统不稳定时刻, δ_u 为 t_u 时刻对应的不稳定功角值。

$$\begin{cases} P_a(t_u) = P_M(t_u) - P_E(t_u) = 0 \\ \left. \frac{dP_a}{dt} \right|_{t=t_u} > 0 \\ \omega(t)|_{t>t_u} > 0 \end{cases} \quad (1)$$

稳定 OMIB 轨迹如图 2 所示。

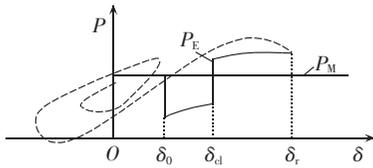


图 2 稳定 OMIB 轨迹

Fig.2 Stable OMIB trajectory

式(2)为稳定轨迹的判断条件,其中, t_r 为返回时刻, δ_r 为 t_r 对应的返回功角值。当返回功角 δ_r 和不稳定功角 δ_u 相等时则为极限稳定(不稳定)情况。

$$\begin{cases} \omega(t_r) = 0 \\ \omega(t)|_{t_0 < t < t_r} > 0 \\ P_a(t_r) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.3 OMIB 模型暂态稳定裕量计算

OMIB 的动态模型由式(3)给出,是等效模型的运动方程;系统的暂态稳定裕量 η 见式(4)。

$$M\ddot{\delta} = M\dot{\omega} = P_M - P_E = P_a \quad (3)$$

$$\eta = A_{dec} - A_{acc} \quad (4)$$

$$A_{dec} = - \int_{\delta_a}^{\delta} P_a d\delta = - \int_{\delta_a}^{\delta} (P_M - P_E) d\delta \quad (5)$$

$$A_{acc} = \int_{\delta_0}^{\delta_a} P_a d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_a} (P_M - P_E) d\delta \quad (6)$$

其中, M 为系统等效惯性系数。

a. 不稳定 OMIB 轨迹暂态稳定裕量。

将 $\delta = \delta_u$ 代入式(3)并与式(4)比较,可得不稳定 OMIB 轨迹的暂态稳定裕量计算公式如下:

$$\eta_u = -\frac{1}{2} M \omega t_u^2 \quad (7)$$

b. 稳定 OMIB 轨迹暂态稳定裕量。

将 $\delta = \delta_r$ 代入式(3),且因 $\omega(t_r) = 0$, 稳定 OMIB 轨迹的暂态稳定裕量计算公式如下:

$$\eta_{st} = - \int_{\delta_0}^{\delta_r} P_a d\delta \approx -\frac{1}{2} P_a(t_r) (\delta_u - \delta_r) \quad (8)$$

2 强励倍数对系统暂态稳定影响模型

2.1 无刷励磁方式下的线性关系影响模型

表 1 和表 2 是 IEEE 3 机 9 节点系统^[18](以下简称系统 1)和新英格兰系统^[19](以下简称系统 2)考虑的预设故障集(故障线路列中的数字为节点编号),机组采用无刷励磁方式,励磁模型采用 FF 卡模型^①。对机组励磁系统配置不同的强励倍数,建立系统 OMIB 模型,计算系统在预设故障下的暂态稳定裕量。时域仿真工具采用 PSD-BPA 4.14,分析环境为 MATLAB 2011b。参照国家标准 GB/T 7409.3—2007《同步电机励磁系统大、中型同步发电机组励磁系统技术要求》^[20],本节机组强励倍数 i 的设置范围为 [1.0, 2.0]。图 3 为对系统 1 机组分别配置不同的强励倍数时,故障 A 下系统暂态稳定裕量及其和强励倍数的关系拟合曲线,详细计算结果见表 3。机组采用无刷励磁方式时,故障 B 下系统暂态稳定裕量及其和强励倍数的关系拟合曲线见图 4。

表 1 IEEE 3 机 9 节点系统预设故障集

Table 1 Preset fault set of IEEE 3-machine 9-bus system

故障名称	故障线路	故障时间/ms	切除时间/ms
A	7-5	1	160
B	7-5	1	200
C	9-6	1	245
D	9-6	1	275

表 2 新英格兰系统预设故障集

Table 2 Preset fault set of New England system

故障名称	故障线路	故障时间/ms	切除时间/ms
E	4-5	1	200
F	3-18	1	200

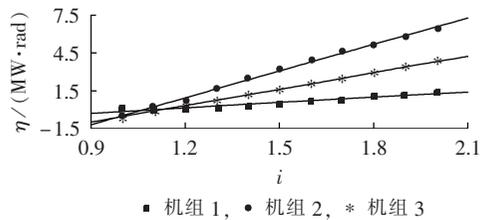


图 3 无刷励磁方式下,系统 1 发生故障 A 时的系统稳定裕量和强励倍数的关系

Fig.3 Relationship between stability margin and FEVR when fault A occurs in system 1 under brushless excitation mode

参照图 3,对系统暂态稳定裕量进行线性拟合。表 4 和表 5 分别为考虑不同预设故障时,系统 1、2 的线性拟合相关系数值。根据拟合相关系数值可知,采用无刷励磁方式时,预设故障下的系统暂态稳定裕量和机组强励倍数之间存在线性关系。

2.2 静止励磁方式下的二次多项式关系影响模型

机组采用静止励磁方式时,模型采用 FD 卡模

① 印永华,卜广全. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册. 2005.

表 3 采用无刷励磁方式后,发生故障 A 时,系统 1 各机组在不同的强励倍数下的暂态稳定裕量

Table 3 Unit transient stability margins of system 1 for different FEVRs when fault A occurs under brushless excitation mode

i	$\eta/(MW \cdot rad)$		
	机组 1	机组 2	机组 3
1.0	-0.0775	-0.4709	-0.6433
1.1	-0.0014	0.2214	-0.0124
1.2	0.0772	0.7411	0.2878
1.3	0.2109	1.6428	0.6921
1.4	0.3591	2.3844	1.1170
1.5	0.5162	3.1060	1.5696
1.6	0.6668	3.8147	2.0137
1.7	0.8211	4.5069	2.4736
1.8	0.9733	5.1748	2.9058
1.9	1.1248	5.8300	3.3357
2.0	1.2483	6.4514	3.7292

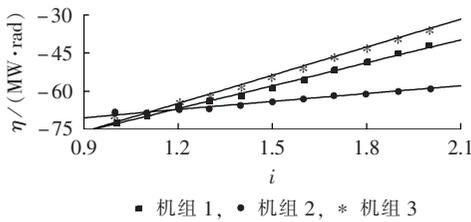


图 4 无刷励磁方式下,系统 1 发生故障 B 时的系统稳定裕量和强励倍数的关系

Fig.4 Relationship between stability margin and FEVR when fault B occurs in system 1 under brushless excitation mode

表 4 不同预设故障下,系统 1 各机组的线性拟合相关系数
Table 4 Unit linear fitting correlation coefficient of system 1 for different preset faults

机组	线性拟合相关系数值			
	故障 A	故障 B	故障 C	故障 D
1	0.9966	0.9993	0.9939	0.9993
2	0.9994	0.9988	0.9912	0.9981
3	0.9994	0.9984	0.9954	0.9912

表 5 不同预设故障下,系统 2 各机组的线性拟合相关系数

Table 5 Unit linear fitting correlation coefficient of system 2 for different preset faults

机组	线性拟合相关系数值	
	故障 E	故障 F
30	0.9996	0.9991
31	0.9994	0.9996
32	0.9992	0.9998
33	0.9987	0.9991
34	0.9990	0.9989
35	0.9957	0.9985
36	0.9990	0.9988
37	0.9992	0.9993
38	0.9965	0.9979
39	0.9959	0.9982

型^①,其他设置同无刷励磁方式。图 5 为配置不同的强励倍数时,系统 1 机组发生故障 B 时系统暂态稳定裕量及其和强励倍数的拟合曲线图,详细计算结

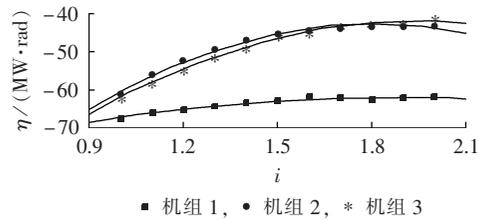


图 5 静止励磁方式下,系统 1 发生故障 B 时的系统稳定裕量和强励倍数的关系

Fig.5 Relationship between stability margin and FEVR when fault B occurs in system 1 under static excitation mode

果见表 6。机组采用静止励磁方式时,系统 1 发生故障 A 时的系统暂态稳定裕量及其和强励倍数的拟合曲线见图 6。

表 6 采用静止励磁方式后,发生故障 B 时,系统 1 各机组在不同的强励倍数下的暂态稳定裕量

Table 6 Transient stability margin of units for different FEVRs when fault B occurs in system 1 under static excitation mode

i	$\eta/(MW \cdot rad)$		
	机组 1	机组 2	机组 3
1.0	-67.6413	-61.3570	-62.3420
1.1	-66.3127	-56.5681	-58.0811
1.2	-65.3469	-52.5398	-54.4833
1.3	-64.4766	-49.5155	-51.2998
1.4	-63.8031	-47.2181	-48.7501
1.5	-63.2485	-45.6048	-46.6498
1.6	-62.8003	-44.5727	-45.0292
1.7	-62.5479	-43.8592	-43.7946
1.8	-62.3956	-43.4791	-42.9135
1.9	-62.3050	-43.2734	-42.3272
2.0	-62.2742	-43.1958	-41.9865

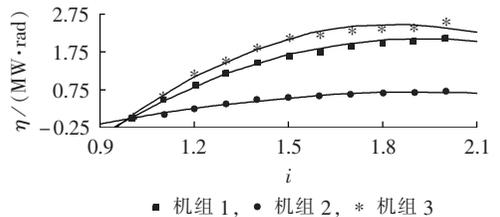


图 6 静止励磁方式下,系统 1 发生故障 A 时的系统稳定裕量和强励倍数的关系

Fig.6 Relationship between stability margin and FEVR when fault A occurs in system 1 under static excitation mode

参照图 5,对系统暂态稳定裕量进行二次多项式拟合。表 7 和表 8 分别为考虑不同预设故障时,系统 1、2 的二次多项式拟合相关系数值。根据拟合相关系数值可知,当机组采用静止励磁方式时,系统暂态稳定裕量与机组强励倍数存在二次多项式关系。

2.3 无刷励磁和静止励磁方式比较

图 7 和图 8 分别为采用无刷和静止励磁方式时,系统 1 发生故障 A 时机组 3 和系统 2 发生故障

① 印永华,卜广全. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册. 2005.

表 7 不同预设故障下,系统 1 各机组的多项式拟合相关系数

Table 7 Unit poliminal fitting correlation coefficient of system 1 for different preset faults

机组	二次多项式拟合相关系数值			
	故障 A	故障 B	故障 C	故障 D
1	0.9989	0.9985	0.9999	0.9991
2	0.9964	0.9939	0.9973	0.9962
3	0.9988	0.9993	0.9999	0.9998

表 8 不同预设故障下,系统 2 各机组的多项式拟合相关系数

Table 8 Unit poliminal fitting correlation coefficient of system 2 for different preset faults

机组	二次多项式拟合相关系数值	
	故障 E	故障 F
30	0.9999	0.9998
31	0.9981	0.9995
32	0.9986	0.9969
33	0.9947	0.9934
34	0.9981	0.9987
35	0.9902	0.9890
36	0.9948	0.9957
37	0.9996	0.9972
38	0.9917	0.9768
39	0.9859	0.9887

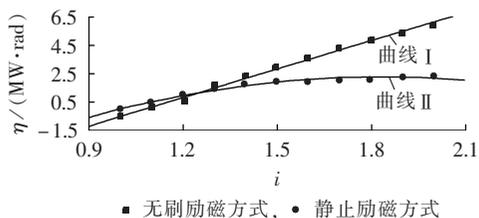


图 7 系统 1 发生故障 A 时,其机组 3 在无刷励磁和静止励磁方式下的稳定裕量和强励倍数的关系
Fig.7 Relationship between stability margin and FEVR of unit 3 when fault A occurs in system 1 for brushless and static excitation modes

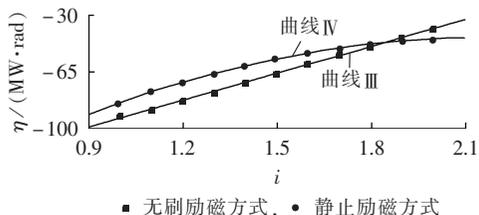


图 8 系统 2 发生故障 E 时,其机组 30 在无刷励磁和静止励磁方式下的稳定裕量和强励倍数的关系
Fig.8 Relationship between stability margin and FEVR of unit 30 when fault E occurs in system 2 for brushless and static excitation modes

E 时机组 30 的系统暂态稳定裕量及其与机组强励倍数的关系拟合曲线。表 9 为图 7、8 中曲线的拟合结果,其中无刷励磁方式下采用线性拟合,静止励磁方式下采用二次多项式拟合。

图 9 为采用静止励磁方式时系统 2 发生故障 F 时机组 38 的暂态稳定裕量-强励倍数曲线。当强励倍

表 9 稳定裕量和强励倍数的关系拟合结果

Table 9 Fitting results of relationship between stability margin and FEVR

曲线	拟合函数	拟合相关系数
I	$\eta = -7.5323 + 7.0459i$	0.9994
II	$\eta = -9.1309 + 12.6058i - 3.4320i^2$	0.9964
III	$\eta = -148.9804 + 55.2744i$	0.9996
IV	$\eta = -182.5195 + 127.6556i - 29.3599i^2$	0.9999

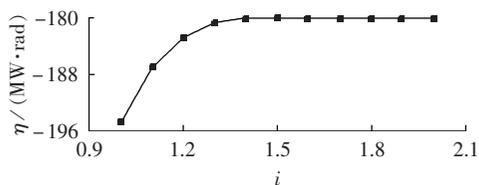


图 9 系统 2 发生故障 F 时,其机组 38 在无刷励磁和静止励磁方式下的稳定裕量和强励倍数的关系
Fig.9 Relationship between stability margin and FEVR of unit 38 when fault F occurs in system 2 for brushless and static excitation modes

数在 [1.0, 1.6] 内时暂态稳定裕量随着强励倍数的增加而增加;强励倍数大于 1.6 之后,产生饱和现象,暂态稳定裕量不再增加,系统的暂态稳定性不再随强励倍数的提高而改善。达到饱和现象之前,静止励磁方式下的二次多项式关系影响模型依然适用。

静止励磁系统饱和现象产生的原因为励磁系统强励能力的饱和。系统故障后,机端电压发生下降,励磁系统强励能力使得机组向系统注入更多的无功功率,维持系统的电压,提高系统的暂态稳定性。无刷励磁方式由于全部励磁功率取自轴系,提高强励倍数即提高励磁顶值电压之后,充足的励磁功率来源保证了励磁系统的强励能力。静止励磁方式励磁功率取自机端,故障严重情况下,机端电压严重下降,即使提高励磁顶值电压,励磁功率的缺失也会使得励磁系统输出的励磁电压不能达到设定的励磁顶值电压,造成强励能力的饱和。

结合计算结果和拟合曲线,静止励磁方式下增加强励倍数改善系统暂态稳定性的能力的方式受到系统故障的影响。对比无刷励磁方式对暂态稳定的线性影响模型和静止励磁方式的二次多项式影响模型可知,一定强励倍数范围内,机组采用无刷励磁方式有利于持续提高系统的暂态稳定性。

3 多机系统机组强励倍数优化配置

尽管相比于静止励磁方式的二次多项式影响模型,一定强励倍数范围内采用无刷励磁,通过增加机组的强励倍数,系统的暂态稳定性可以得到持续提高,但由于无刷励磁对励磁机、旋转二极管等方面的要求,对相同规模机组,无刷励磁系统成本一般大于静止励磁系统^[21]。提高励磁系统强励倍数意味着励磁系统成本的增加。励磁系统的总投资一定时,

可通过机组强励倍数的优化配置,增加系统暂态稳定裕量,提高系统的暂态稳定性。

3.1 优化配置模型

3.1.1 考虑强励倍数励磁系统成本模型

文献[20]中规定励磁系统最低强励倍数为 1.6,优化配置模型中励磁系统额定强励倍数不妨设为 1.6。不考虑市场因素,励磁系统的额定成本近似和机组额定容量成正比。式(9)为机组励磁系统额定成本 C_N 的计算公式。

$$C_N = C_0 P_N \quad (9)$$

其中, C_0 为成本系数; P_N 为机组额定容量。

目前部分实际机组励磁系统强励倍数可以超过 2.0^[8],优化配置模型中励磁系统强励倍数设置区间设为 $I_1 = [1.0, 2.5]$ 。因为强励倍数额定值为 1.6,强励倍数可调节区间设为 $I_2 = [1.6, 2.5]$ 。假设励磁系统成本和强励倍数之间存在线性关系,则式(10)是强励倍数为 i 时励磁系统成本 $C(i)$ 的计算公式。

$$C(i) = [1 + (i - 1.6)k] C_N \quad (10)$$

其中, k 为递增常数。

3.1.2 暂态稳定影响模型

根据无刷励磁方式下系统暂态稳定裕量与强励倍数存在的线性关系,以及静止励磁方式下两者之间存在的二次多项式关系,结合图 3 和图 5,建立系统 OMIB 模型计算强励倍数对应的暂态稳定裕量,通过线性和二次多项式拟合得到暂态稳定裕量-强励倍数曲线。因为静止励磁方式存在饱和现象,一般取较小的强励倍数进行计算拟合以减小饱和现象造成的影响,待拟合数据点对应的强励倍数选取区间取 $I_3 = [1, 1.3]$ 。

$$\eta_{\text{lin}}(i) = a_{\text{lin}} + b_{\text{lin}} i \quad (11)$$

$$\eta_{\text{sta}}(i) = a_{\text{sta}} + b_{\text{sta}} i + c_{\text{sta}} i^2 \quad (12)$$

$$\eta'_{\text{sta}}(i_{\text{full}}) = 2c_{\text{sta}} i_{\text{full}} + b_{\text{sta}} = 0 \quad (13)$$

$$\eta_{\text{sta_full}}(i) = \eta_{\text{sta}}(i_{\text{full}}) \quad (14)$$

式(11)为无刷励磁方式下系统暂态稳定裕量-强励倍数拟合曲线函数,区间 I_3 内取 3 个强励倍数,计算系统在不同强励倍数下的暂态稳定裕量,系数 a_{lin} 和 b_{lin} 通过对 3 组数据的线性拟合得到。式(12)为静止励磁方式下系统暂态稳定裕量-强励倍数的拟合曲线函数,区间 I_3 内取 4 个强励倍数计算得到待拟合数据,系数 a_{sta} 、 b_{sta} 、 c_{sta} 通过对这些数据进行二次多项式拟合得到。满足式(13)的 i_{full} 为静止励磁方式下的饱和强励倍数,若 $i_{\text{full}} \in I_1$ 则存在饱和现象。对 $i \in I_1$ 且 $i \geq i_{\text{full}}$,则通过式(14)计算对应的暂态稳定裕量。

3.1.3 暂态稳定边际成本

式(15)为机组暂态稳定边际成本 L 的计算公式。当机组采用无刷励磁方式时 $\eta(i) = \eta_{\text{lin}}(i)$,采用静止

励磁方式时 $\eta(i) = \eta_{\text{sta}}(i)$ 。

$$L(i) = C'(i) / \eta'(i) \quad i \in I_2 \quad (15)$$

边际成本 $L(i)$ 的含义是机组在强励倍数下,系统增加单位暂态稳定裕量对应的励磁系统的增加成本。若有多台机组强励倍数在可调节区间 I_2 内,优先增加暂态稳定边际成本最小机组的强励倍数。

3.2 强励倍数优化配置算法

考虑励磁系统总投资一定,机组励磁方式确定,系统可能发生的主要故障为预设故障。通过机组强励倍数优化配置,使系统在预设故障下暂态稳定性最佳。图 10 为优化配置算法流程,其中, G 为机组集合; i_p 为机组 p 强励倍数; $C_p(i_p)$ 为机组 p 励磁成本函数; $\eta_p(i_p)$ 为机组 p 暂态稳定裕量-强励倍数拟合曲线函数; $L_p(i_p)$ 为机组 p 暂态稳定边际成本; C_{sum} 为励磁系统总投资; Δi 为强励倍数递增常数。

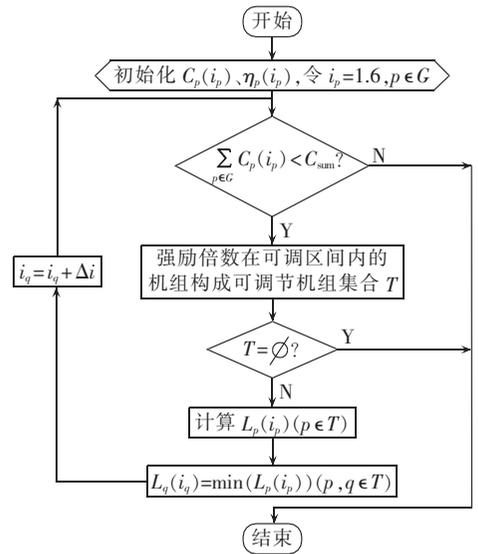


图 10 所提算法的流程

Fig.10 Flowchart of proposed algorithm

根据系统参数构造机组考虑强励倍数的励磁成本 $C_p(i_p)$,确定系统考虑的主要预设故障。根据机组不同励磁方式,在 I_3 内选取强励倍数,计算系统暂态稳定裕量,通过拟合得到机组暂态稳定裕量-强励倍数拟合曲线函数。

强励倍数在可调节区间内的机组构成可调节机组集合 T ,计算 T 内所有机组的暂态稳定边际成本 $L_p(i_p)$,递增边际成本最小的机组的励磁系统强励倍数。若此时励磁系统总成本小于总投资 C_{sum} 且 T 非空,则重复暂态稳定边际成本的计算及机组强励倍数的递增,否则结束循环。此时得到的系统各机组强励倍数即为考虑主要故障下励磁总投资为 C_{sum} 时多机系统机组强励倍数最优配置结果。

3.3 考虑多故障情况的机组强励倍数优化

考虑到故障点位置及故障形式的不同对暂态稳定裕量及边际成本的影响,式(16)和(17)分别为系

统考虑多故障情况的概率暂态稳定裕量 η_p 和概率暂态稳定边际成本 $L_p(i)$ 的计算公式。

$$\eta_p = \sum_{n \in N_F} p_n \eta_n \quad (16)$$

$$L_p(i) = \sum_{n \in N_F} p_n L_n(i) \quad (17)$$

其中, N_F 为系统考虑的多故障集合; p_n 为故障 n 的相对发生概率; η_n 为故障 n 下系统的暂态稳定裕量; $L_n(i)$ 为机组在强励倍数 i 的条件下对应故障 n 的暂态稳定边际成本, 利用故障相对发生概率对不同故障条件下的机组暂态稳定边际成本加权求和, 即为概率暂态稳定边际成本。值得注意的是, 机组采用静止励磁方式时, 考虑到饱和现象的存在, 若机组仅对部分故障饱和, 则利用式 (18) 计算机组概率暂态稳定边际成本, 其中 $N_{F_{\text{sum}}}$ 为机组的强励倍数 i 的条件下对应的不饱和和故障集合。

$$L'_p(i) = \sum_{n \in N_{F_{\text{sum}}}} p_n L_n(i) / \sum_{n \in N_{F_{\text{sum}}}} p_n \quad (18)$$

系统考虑多故障情况, 以系统概率暂态稳定裕量为优化目标, 在强励倍数优化配置算法中, 用机组概率暂态稳定边际成本代替系统仅考虑主要故障情况的边际成本, 计算流程同单一故障情况。在励磁系统总投资一定的情况下优先增加概率暂态稳定边际成本最小机组的强励倍数, 计算得到的强励倍数最优配置结果使得多故障情况下系统概率暂态稳定裕量最大。

4 算例分析

4.1 系统 1 算例

系统 1 数据见文献 [18], 假设机组均采用无刷励磁方式, 额定强励倍数设为 1.6, 系统考虑的主要故障对应表 1 中的故障 D。强励调节区间设为 $I_2 = [1.6, 2.5]$, 拟合数据强励倍数的选取区间设为 $I_3 = [1, 1.3]$ 。无刷励磁方式系统成本系数设为 $C_0 = 1 (\text{MV} \cdot \text{A})^{-1}$, 非额定状态下励磁系统成本递增常数设为 $k = 1$, 励磁系统总投资 C_{sum} 进行归一化处理取为 1000, 强励倍数递增常数设为 $\Delta i = 0.01$ 。

因为机组均采用无刷励磁方式, 所以在 I_3 内选取 1.0、1.1 和 1.2 这 3 个强励倍数, 计算系统在不同机组相应强励倍数下的暂态稳定裕量, 计算结果见表 10。对表 10 中的计算结果进行线性拟合得到的机组稳定裕量-强励倍数曲线函数如表 11 所示。

系统机组强励倍数优化配置算法的计算结果为: 机组 2 和机组 3 的强励倍数达到可调节区间 I_2 中的最大值 2.5, 机组 1 的强励倍数为 2.18。表 12 列出了系统在 6 种机组强励倍数不同配置下的各机组强励倍数及系统对应的暂态稳定裕量。图 11、12 分别为额定配置和最优配置下系统 OMIB 模型功角特性曲线。机组强励倍数额定配置下系统的 OMIB 功角特性对应不稳定 OMIB 轨迹, 预设故障下系统暂

表 10 系统 1 在不同强励倍数下的暂态稳定裕量
Table 10 Transient stability margin of system 1 for different FEVRs

i	暂态稳定裕量/(MW·rad)		
	机组 1	机组 2	机组 3
1.0	-70.4907	-72.0104	-73.9603
1.1	-69.5500	-69.6773	-72.5220
1.2	-68.1494	-66.7990	-70.3951

表 11 系统 1 各机组的励磁成本函数和暂态稳定裕量拟合函数

Table 11 Excitation cost function and transient stability margin fitting function for units of system 1

机组	$C_p(i)$	$\eta_p(i)$
1	$[1 + (i - 1.6)k]C_0 \times 247.5$	$-82.2739 + 11.7065i$
2	$[1 + (i - 1.6)k]C_0 \times 192$	$-98.1583 + 26.0570i$
3	$[1 + (i - 1.6)k]C_0 \times 128$	$-91.9011 + 17.8260i$

表 12 系统 1 在不同强励倍数配置方案下的暂态稳定裕量结果

Table 12 Transient stability margin of system 1 for different FEVR configurations

配置方式	i			C_{sum}	暂态稳定裕量/(MW·rad)
	机组 1	机组 2	机组 3		
额定	1.60	1.60	1.60	567.5	-30.8626
最优	2.18	2.50	2.50	1000	7.2989
1	2.22	2.45	2.50	1000	7.1053
2	2.21	2.50	2.45	1000	7.1503
3	2.50	2.50	1.89	1000	-2.0170
4	2.50	2.09	2.50	1000	0.4361

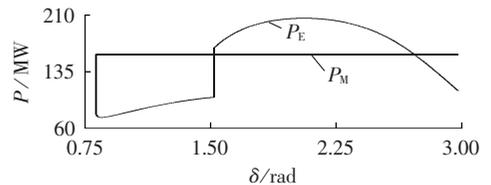


图 11 额定配置下 OMIB 模型的功角特性
Fig.11 Power-angle characteristics of OMIB model with nominal FEVR configuration

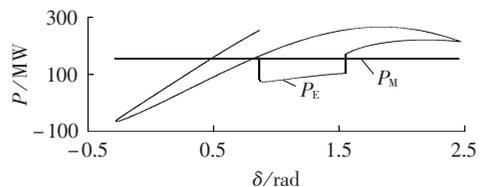


图 12 最优配置下系统 OMIB 模型的功角特性
Fig.12 Power-angle characteristics of OMIB model with optimal FEVR configuration

态失稳。最优配置下系统的 OMIB 功角特性对应稳定 OMIB 轨迹, 系统保持暂态稳定。

配置方式 1 和配置方式 2 是最优配置方式的 2 组对比配置, 比较最优配置方式、配置方式 1 和配置方式 2 下的系统暂态稳定裕量值可知, 最优配置方式下系统暂态稳定裕量最大。励磁系统总投资一定时, 励磁系统强励倍数最优配置方式下系统在主要预设故障时暂态稳定性最佳。

若计算过程中优先增加暂态稳定边际成本最大机组的强励倍数,机组强励倍数配置结果为表 12 中的配置方式 3,对应的系统暂态稳定裕量为 $-2.0107 \text{ MW}\cdot\text{rad}$,系统暂态不稳定。配置方式 4 为总投资一定时,不考虑机组暂态稳定边际成本,优先增加对系统暂态稳定裕量影响最大的机组,即 $\eta'(i)$ 最大的机组的强励倍数。由表 12 可见,配置方式 4 下,系统暂态稳定,但系统暂态稳定裕量低于考虑边际成本的最优配置方案。配置方式 3、4 的结果进一步说明计算过程中优先增加暂态稳定边际成本最小机组的强励倍数的合理性。

4.2 系统 2 算例

系统 2 的数据见文献[19],设置机组 30 和机组 33 采用静止励磁方式,其他机组采用无刷励磁方式。设置无刷励磁方式下 $C_0=1(\text{MV}\cdot\text{A})^{-1}$,静止励磁方式下 $C_0=0.9(\text{MV}\cdot\text{A})^{-1}$ 。设励磁系统总投资 $C_{\text{sum}}=10000$,其他参数设置同 4.1 节算例。

4.2.1 考虑系统单一故障情况

系统考虑的主要故障为表 2 中故障 E,主要故障 E 下机组强励倍数最优配置计算结果见表 13,对应机组强励倍数见表 14。

表 13 发生单一故障时,系统 2 在不同强励倍数配置方案下的暂态稳定裕量

Table 13 Transient stability margin of system 2 with single fault for different FEVR configurations

配置方式	C_{sum}	暂态稳定裕量/(MW·rad)
最优	10000	26.9108
1	10000	26.8960
2	10000	26.8881

表 14 发生单一故障时,系统 2 的强励倍数配置方案
Table 14 FEVR configuration of system 2 with single fault

配置方式	i				
	机组 30	机组 31	机组 32	机组 33	机组 34
最优	2.16	2.50	2.50	1.60	2.50
1	2.16	2.50	2.50	1.60	2.50
2	2.16	2.50	2.50	1.60	2.50

配置方式	i				
	机组 35	机组 36	机组 37	机组 38	机组 39
最优	2.50	1.60	2.50	2.50	1.99
1	2.50	1.60	2.50	2.45	2.03
2	2.50	1.60	2.45	2.50	2.02

因系统额定配置下对故障 E 保持暂态稳定,表 13 中暂态稳定裕量是相对于额定配置的计算结果。对比表 13、14 中的计算结果,系统 2 考虑单一故障 E 时,在励磁系统总投资为 10000 的情况下按最优配置系统的暂态稳定性最佳。

4.2.2 考虑系统多故障情况

考虑系统多故障情况,故障选取表 2 中故障 E 和 F,故障 E 和 F 的相对发生概率分别设为 0.7 和 0.3。

多故障情况下,系统机组在强励倍数最优配置方式、配置方式 1 和配置方式 2 下对应的概率暂态稳定裕量见表 15,相应的机组强励倍数见表 16。由表 15 可知,系统 2 在励磁总投资为 10000 时,在最优配置下系统的概率暂态裕量最大。

表 15 发生复合故障时,系统 2 在不同强励倍数配置方案下的概率暂态稳定裕量

Table 15 Probabilistic transient stability margin of system 2 with multiple faults for different FEVR configurations

配置方式	C_{sum}	概率暂态稳定裕量/(MW·rad)
最优配置	10000	28.8377
1	10000	28.7387
2	10000	28.8245

表 16 发生复合故障时,系统 2 的强励倍数配置方案
Table 16 FEVR configuration of system 2 with multiple faults

配置方式	i				
	机组 30	机组 31	机组 32	机组 33	机组 34
最优	2.50	2.50	2.50	1.60	2.50
1	2.50	2.50	2.50	1.60	2.50
2	2.50	2.50	2.50	1.60	2.50

配置方式	i				
	机组 35	机组 36	机组 37	机组 38	机组 39
最优	2.50	1.60	2.50	2.50	1.91
1	2.50	1.60	2.50	2.45	1.95
2	2.50	1.60	2.45	2.50	1.94

表 17 为保持其他参数不变,励磁系统总投资变化时对应最优配置下系统的概率暂态稳定裕量计算结果。励磁系统总投资一定时,采用强励倍数最优配置,系统暂态稳定性最佳。若最优配置下机组强励倍数可进一步增加,可以采用增加励磁系统总投资的方法进一步改善系统的暂态稳定性。

表 17 采用强励倍数最优配置方案时,系统 2 在不同励磁系统总投资下的概率暂态稳定裕量

Table 17 Probabilistic transient stability margin of system 2 with optimal FEVR configuration for different C_{sum} values

C_{sum}	概率暂态稳定裕量/(MW·rad)
9000	20.9272
9500	25.0952
10000	28.8377

5 结论

本文建立了无刷励磁方式对系统暂态稳定的线性关系影响模型及静止励磁方式对暂态稳定的二次多项式关系影响模型;考虑了静止励磁的饱和现象,和无刷励磁相比,饱和现象的存在使得静止励磁方式强励倍数的增加不能持续改善系统的暂态稳定性;提出了多机系统机组强励倍数优化配置算法,通过优化配置算法计算得到机组强励倍数最优配置。励磁系统总投资一定时,机组强励倍数最优配置使系统故障情况下的暂态稳定裕量最大,系统暂态稳

定性达到最佳。

参考文献:

- [1] 张立霞,王高山,汪友华,等. 暂态稳定分析典型励磁模型仿真研究[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):77-85.
ZHANG Lixia,WANG Gaoshan,WANG Youhua,et al. Simulation of typical excitation models for power system transient stability analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):77-85.
- [2] 丛钱尤. 永磁无刷励磁与静止励磁的不同特点[J]. 电机技术,2012(3):33-34.
CONG Qianyou. Characteristic difference between PM brushless excitation system and static excitation system[J]. Electrical Machine Technology,2012(3):33-34.
- [3] 方思立. 大型发电机自并励系统强励倍数计算[J]. 电力标准化与技术经济,2007,16(2):39-40.
FANG Sili. The ratio of ceiling voltage of potential source static excitation system for large generators[J]. Electric Power Standardization & Construction Cost Information,2007,16(2):39-40.
- [4] 张玫,朱方,刘增煌. 大型汽轮发电机采用自并励励磁系统的可行性分析[J]. 电网技术,1997,21(12):38-44.
ZHANG Mei,ZHU Fang,LIU Zenghuang. Feasibility analysis of using bus fed static excitation system to large turbogenerator[J]. Power System Technology,1997,21(12):38-44.
- [5] WANG Y,HILL D J,MIDDLETON R H,et al. Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1993,8(2):620-627.
- [6] 吴跨宇,陈新琪,孙维真,等. 发电机励磁系统强励功能分析与核算[J]. 浙江电力,2012,31(7):15-18.
WU Kuayu,CHEN Xinqi,SUN Weizhen,et al. Analysis and check on forced excitation of generator excitation system[J]. Zhejiang Electric Power,2012,31(7):15-18.
- [7] 张栩,彭志炜,邱国跃,等. 自并励静态励磁系统自动电压调节器参数对暂态稳定性的影响仿真[J]. 大电机技术,2013(4):56-60.
ZHANG Xu,PENG Zhiwei,QIU Guoyue,et al. Influence of AVR parameters of static excitation system on transient stability[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2013(4):56-60.
- [8] 孙士云,束洪春,唐岚,等. 强励对交直流混合输电系统暂态稳定裕度的影响[J]. 电网技术,2008,32(23):35-39.
SUN Shiyun,SHU Hongchun,TANG Lan,et al. Influence of forced exaction on transient stability margin of AC/DC hybrid power transmission system[J]. Power System Technology,2008,32(23):35-39.
- [9] 黄弘扬,徐政,华文,等. 基于广域测量系统的发电机强励控制方案[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6):49-56.
HUANG Hongyang,XU Zheng,HUA Wen,et al. Forced excitation control scheme based on wide-area measurement system[J]. Power System Protection and Control,2013,41(6):49-56.
- [10] ZHANG Y,ROUSSEAU P,WEHENKEL L,et al. SIME:a comprehensive approach to fast transient stability assessment[C]// Proceeding of the IEE Japan'96 Conference. Osaka,Japan:IEE of Japan,1996:177-182.
- [11] 吴政球,周野,陈辉华,等. 基于不同等值机的暂态稳定分析与控制[J]. 电网技术,2011,35(2):58-65.
WU Zhengqiu,ZHOU Ye,CHEN Huihua,et al. Transient stability analysis and control based on different equivalents[J]. Power System Technology,2011,35(2):58-65.
- [12] 黄玉龙,刘明波. 基于单机无穷大母线等值和轨迹灵敏度的暂态稳定约束最优潮流[J]. 中国电机工程学报,2011,31(13):86-93.
HUANG Yulong,LIU Mingbo. Transient stability constrained optimal power flow based on OMIB equivalent and trajectory sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(13):86-93.
- [13] 黄玉龙,刘明波. 求解暂态稳定约束最优潮流的混合算法[J]. 电工技术学报,2012,27(5):229-237.
HUANG Yulong,LIU Mingbo. Hybrid algorithm for solution of transient stability constrained optimal power flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(5):229-237.
- [14] 李兆伟,贺静波,方勇杰,等. 计及暂态稳定约束的电厂送出系统重合闸时间整定方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(2):116-120.
LI Zhaowei,HE Jingbo,FANG Yongjie,et al. Research on the method to set reclosing time of power plant transmission system considering transient stability constraints[J]. Power System Protection and Control,2014,42(2):116-120.
- [15] PAVELLA M,ERNST D,RUIZ-VEGA D. Transient stability of power systems:a unified approach to assessment and control[M]. Norwell,MA,USA:Kluwer Academic Publishers,2000.
- [16] ZHANG Y,WEHENKEL L,ROUSSEAU P,et al. SIME:A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection[J]. Electrical Power & Energy Systems,1997,19(3):195-208.
- [17] 黄玉龙,刘明波. 基于单机无穷大母线等值和轨迹灵敏度的暂态稳定最优励磁控制[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):89-97.
HUANG Yulong,LIU Mingbo. Optimal transient stability excitation control based on OMIB equivalents and trajectory sensitivities[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(10):89-97.
- [18] SAUER P W,PAI M A. Power system dynamics and stability[M]. [S.l.]:Prentice Hall,1998.
- [19] PAI M A. Energy function analysis for power system stability[M]. Norwell,MA,USA:Kluwer Academic Publishers,1989.
- [20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T7409.3—2007 同步电机励磁系统大、中型同步发电机组励磁系统技术要求[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [21] 刘念,谢驰,王涛,等. 基于免疫算法的无刷励磁发电机旋转整流器故障诊断[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):32-35.
LIU Nian,XIE Chi,WANG Tao,et al. Immune algorithm in rotating rectifier fault diagnosis of brushless generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(5):32-35.

作者简介:



周云

周云(1990—),男,江苏丹阳人,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行及稳定分析(E-mail:zhouyun_sjtu@sina.com);
严正(1964—),男,江西上饶人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析、电力市场和智能电网。

Optimal FEVR configuration of generation units in multi-machine power system

ZHOU Yun¹, YAN Zheng¹, LI Naihu^{1,2}, CAO Lu³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Alstom Grid China Technology Center, Shanghai 201114, China;

3. East China Grid Company Limited, Shanghai 200120, China)

Abstract: Since the increase of unit FEVR (Force Excitation Voltage Ratio) may improve the transient stability of multi-machine power system, an algorithm for the optimal unit FEVR configuration of multi-machine power system is studied. An OMIB (One-Machine-Infinite-Bus) model of multi-machine power system is built to calculate quantitatively its transient stability margin. The influence of FEVR on the transient stability margin is modeled respectively in brushless excitation and static excitation modes, based on which, an algorithm for the optimal unit FEVR configuration of multi-machine power system is proposed, which preferentially increases the FEVRs of the units with low transient stability marginal cost during single system fault while increases the FEVRs of the units with low probabilistic transient stability marginal cost during multiple system faults. The FEVRs of IEEE 3-machine 9-bus system and New England system are optimized with the proposed algorithm and the simulative results show that the system with the proposed optimal FEVR configuration has better transient stability.

Key words: electric generators; force excitation voltage ratio; electric excitation; optimization; transients; stability; models

(上接第 112 页 continued from page 112)

Measuring unbalance degree of multi-circuit transmission lines on same tower with consideration of lightning conductor

WANG Yufei, XU Xing, XUE Hua

(School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: For the optimal design and operation of multi-circuit transmission lines on same tower, their impedance parameters are calculated with the influences of lightning conductors considered and a method of measuring the line unbalance degree is proposed, which characterizes its physical nature. The unbalance degree of six-circuit transmission lines on same tower is simulated and calculated with PSCAD software and the influence of lightning conductor connection pattern on the line unbalance degree is analyzed for different line lengths and different phase sequence layouts. Results show that, being practical and convenient, the proposed method can precisely reflect the property of line unbalance and select the optimal phase sequence layouts; the lightning conductor connection pattern is the main influencing factor of line zero-sequence unbalance degree.

Key words: electric power transmission; multi-circuit transmission lines on same tower; lightning conductor; unbalance degree; phase sequence layout; computer simulation