

低压配电网电动机起动时的潮流分布计算及压降校验

低压配电网电动机起动时的压降校验，目前普遍采用《工业与民用配电设计手册》等设计手册中给出的短路容量的计算方法。提出了基于电动机起动时的电网潮流分布计算，来求解电动机起动时的电压降落的方法，同时结合典型的算例，计算并验证电动机起动方式的选择，并与《工业与民用配电设计手册》的计算结果作了对比。

尹丽君/交通运输部水运科学研究院



尹丽君/副研究员

0 引言

低压电动机的起动方式的选择分为全压起动和降压起动。全压起动时起动转矩大，有利于电动机起动；但同时起动电流和起动压降也很大，易使供电设备产生短时过负荷，特别是对母线上其他对电压稳定要求较高的用电设备有影响。

电动机起动时需要满足的电压条件如下。

1) 电动机端子电压应能保证机械要求的起动转矩，这是保证电动机能够动起来的先决条件。

2) 电动机所在配电母线电压降落不超过规范允许值。电动机起动时会对所在母线上的其他设备有不同程度的影响，为保证其他设备的正常运行，需保证母线电压水平。

对于低压配电网电动机起动时的电压降校验，设计中常用的《工业与民用配电设计手册》、《钢铁企业电力设计手册》中给出的计算方法相同。其中，对于起动回路的额定输入容量，手册中给出的公式为

$$S_{st} = \frac{1}{\frac{1}{S_{stM}} + \frac{X_1}{U_m^2}} \quad (1)$$

式中， S_{st} 为始端输入容量； S_{stM} 为末端负荷的需求容量。

从式(1)看出，电动机起动时起动回路的始端输入容量 S_{st} 要小于末端负荷的需求容量 S_{stM} 。但从电网潮流分布来看，除非回路中有能量反馈，否则回路始端的容量一般不会小于末端需求的容量。而电动机起动初始，需要消耗较多的无功来建立磁场，其中大部分无功均来自于电网，线路对地电容通常也比较小，并不存在电动机反馈电网的情况。因此，式(1)从直观意义上容易引起误解。

本文利用起动状态下低压配电网的潮流分布计算，追踪电网中的复功率分布和电压降落，从而判断母线电压和电动机端子电压是否满足要求。

1 潮流分布计算

潮流计算是电力系统正常运行状况的分析和计算，用于求取电压、电流和功率的分布，即潮流分布。

对于给定末端负荷功率和始端电压的情况，推算潮流分布的步骤大致是：先运用假设的末端电压和给定的末端功率由末端向始端逐段推算，求得始端电压和始端功率；再用给定的始端电压和求得的始端功率由始端向末端逐段推算，求得末端电压和末端功率；然后，再用求得的末端电压和给定的末端功率再一次由末端向始端逐段推算，再一次

关键词/Keywords

电动机起动 ·
潮流分布 ·
压降校验 ·

求得始端电压和功率；以此类推^[1]。

在实践应用中，往往不需要反复迭代，经过一次往返一般即可获得足够精确的结果。

1.1 线路上的电压降落和功率损耗

线路等效电路如图1所示。

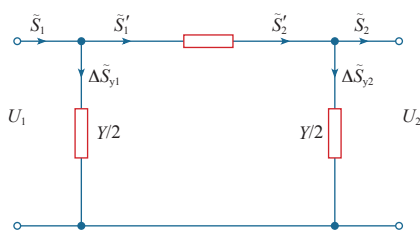


图1 电力线路的电压和功率

假设已知末端电压 U_2 （取 $U_2 = U_2 \angle 0^\circ$ ）、末端功率 $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，则阻抗支路末端的功率为

$$\tilde{S}_2 = \hat{S}_2 + \Delta\tilde{S}_2 = P_2' + jQ_2' \quad (2)$$

阻抗支路损耗的功率为

$$\Delta\tilde{S}_2 = \left(\frac{\tilde{S}_2'}{U_2} \right)^2 Z = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R + jX) \quad (3)$$

阻抗支路始端的功率为

$$\tilde{S}_1' = \tilde{S}_2' + \Delta\tilde{S}_2 = P_1' + jQ_1' \quad (4)$$

始端功率为

$$\tilde{S}_1 = \tilde{S}_1' + \Delta\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad (5)$$

始端电压为

$$\begin{aligned} U_1 &= U_2 + I_2 Z = U_2 + \left(\frac{\tilde{S}_2'}{U_2} \right)^* Z \\ &= U_2 + \frac{P_2' - jQ_2'}{U_2} (R + jX) \\ &= \left(U_2 + \frac{P_2' R + Q_2' X}{U_2} \right) + j \left(\frac{P_2' X - Q_2' R}{U_2} \right) \\ &= (U_2 + \Delta U) + j\delta U \end{aligned} \quad (6)$$

电压降落的纵、横分量分别为

$$\Delta U = \frac{P_2' R_T + Q_2' X_T}{U_2} \quad (7)$$

$$\delta U = \frac{P_2' X_T - Q_2' R_T}{U_2} \quad (8)$$

电压降落的横分量 δU 一般远小于纵分量 ΔU ，可忽略不计。

变压器中的电压降落和功率损耗的推算与线

路相似，只是变压器的等效电路不同，在此不再赘述。

1.2 潮流分布计算简化

低压配电网通常假定接入了无限大容量的电源，即始端的电压保持为额定电压。对于已知始端电压、给定末端负荷的相对简单的低压电网，计算潮流分布时的简化计算步骤如下。

开始由末端向始端推算时，设全网电压都为额定电压，仅计算各元件中的功率损耗而不计算电压降落；待求得始端功率后，再运用给定的始端电压和求得的始端功率由始端向末端逐段推算电压降落，但这时不再重新计算功率损耗^[1]。

值得说明的是，潮流计算中的逐段推算都是将所有参数和变量归算至同一电压等级后进行，在求得各母线电压后，再按相应的电压比将它们归算至原电压级。

1.3 电动机启动时潮流分布计算的设定条件

1) 设定电力系统为无穷大电源，即电源电压在电动机启动过程中保持不变。

2) 忽略变压器电阻，仅考虑电抗。

3) 忽略线路导纳和变压器励磁支路导纳，仅考虑阻抗。

4) 由于一般情况下， $U_2 + \Delta U \gg \delta U$ ，因此在实际计算中，忽略电压降落的横分量，即略去 δU 。

2 算例验证

简单的低压配电网结构图如图2所示。末端笼型电动机首先考虑采用直接启动。

(1) 计算元件和线路的参数（归算至0.4 kV侧）

变压器： $X_T = \frac{u_k \%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} = \left(\frac{6}{100} \times \frac{0.4^2}{2} \right) \text{ m}\Omega = 4.8 \text{ m}\Omega$ 。

线路1： $R_1 = r_1 l_1 = (0.024 \ 4 \times 147) \text{ m}\Omega = 3.582 \text{ m}\Omega$ ， $X_1 = x_1 l_1 = (0.077 \times 147) \text{ m}\Omega = 11.32 \text{ m}\Omega$ 。

线路2： $R_2 = r_2 l_2 = (0.146 \ 2 \times 105) \text{ m}\Omega = 15.351 \text{ m}\Omega$ ， $X_2 = x_2 l_2 = (0.076 \times 105) \text{ m}\Omega = 7.98 \text{ m}\Omega$ 。

母线m1其他负荷： $\tilde{S}_{m1} = 0.8464 + j0.6348 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

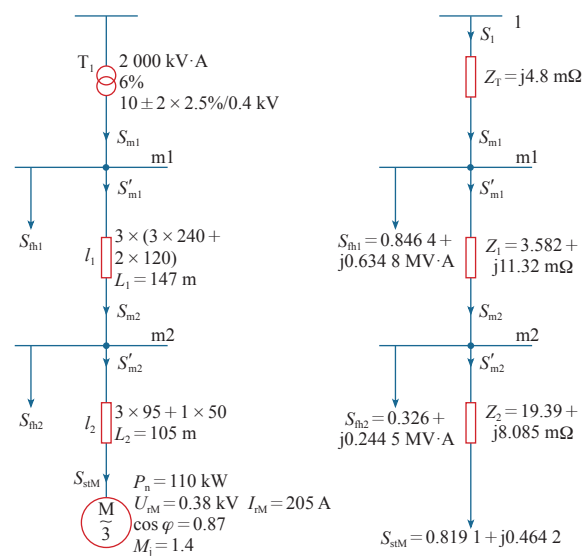


图2 电网结构图等效电路图

母线m2其他负荷： $\tilde{S}_{th2} = 0.326 + j0.2445 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。
电动机起动容量： $\tilde{S}_{stM} = 0.8191 + j0.4642 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。

(2) 计算功率损耗 (归算至0.4 kV侧)

直接起动时的功率分布计算如表1所示。

表1 直接起动时的功率分布计算

序号	计算项	计算结果/MV·A
1	线路2的功率损耗 $\Delta\tilde{S}_2$	0.085 05 + j0.044 21
2	线路2始端复功率 $\tilde{S}'_{m2}$	0.904 15 + j0.508 4
3	线路1末端复功率 $\tilde{S}_{m2}$	1.230 15 + j0.752 9
4	线路1的功率损耗 $\Delta\tilde{S}_1$	0.046 57 + j0.147 2
5	线路1始端复功率 $\tilde{S}'_{m1}$	1.276 7 + j0.900 1
6	变压器支路末端复功率 $\tilde{S}_{m1}$	2.123 1 + j1.534 9
7	变压器上的功率损耗 $\Delta\tilde{S}_T$	j0.205 9
8	变压器支路始端复功率 $\tilde{S}_1$	2.123 1 + j1.740 8

(3) 由设定的始端电压 U_1 和求得的始端功率 $\tilde{S}_1$ 计算电压降落

直接起动时的电压及电压降落如表2所示。

表2 直接起动时的电压及电压降落

序号	计算项	计算结果
1	变压器上的电压降落 $\Delta U_T/\text{kV}$	0.020 89
2	母线m1电压 U_{m1}/kV	0.379 1
3	线路1上的电压降落 $\Delta U_{l1}/\text{kV}$	0.038 94
4	母线m2电压 U_{m2}/kV	0.340 2
5	线路2上的电压降落 $\Delta U_{l2}/\text{kV}$	0.052 72
6	电动机端子电压 U_{stM}/kV	0.287 5
7	母线m1电压相对值 $u_{m1}/\%$	94.78

(续)

序号	计算项	计算结果
8	母线m2电压相对值 $u_{m2}/\%$	85.05
9	电动机端子电压相对值 $u_{stM}/\%$	75.66

(4) 是否满足起动时的压降要求

m1母线上接有照明设备, 根据规范要求, 电动机不频繁起动时, m1母线电压不应低于额定电压的85%, $u_{m1} = 94.78\% > 85\%$, 满足要求。

m2母线上未接照明或其他对电压波动比较敏感的负荷, 根据规范要求, m2母线电压不应低于额定电压的80%, $u_{m2} = 85.05\% > 80\%$, 满足要求。

电动机起动时, 电动机端子电压应能保证传动

机械要求的起动转矩, 即: $u_{stM} \geq \sqrt{\frac{1.1 \times M_j}{M_{stM}}}$, 根据

给定参数, $\sqrt{\frac{1.1 \times M_j}{M_{stM}}} = \sqrt{\frac{1.1 \times 1.4}{2.1}} = 85.6\%$, $u_{stM} = 75.66\%$, 不满足起动条件。

在给定条件下, 电动机采用直接起动难以克服静阻转矩, 故考虑采用软起动器起动, 计算结果如表3所示。

表3 软起动器起动时的功率分布与电压降落

序号	计算项	电压及降落
1	变压器上的电压降落 $\Delta U_T/\text{kV}$	0.016 28
2	母线m1电压 U_{m1}/kV	0.383 7
3	线路1上的电压降落 $\Delta U_{l1}/\text{kV}$	0.025 32
4	母线m2电压 U_{m2}/kV	0.358 4
5	线路2上的电压降落 $\Delta U_{l2}/\text{kV}$	0.027 47
6	电动机端子电压 U_{stM}/kV	0.330 9
7	母线m1电压相对值 $u_{m1}/\%$	95.92
8	母线m2电压相对值 $u_{m2}/\%$	89.6
9	电动机端子电压相对值 $u_{stM}/\%$	87.08

由表3可得, 电动机采用软起动器起动时, m1母线电压和m2母线电压均能满足规范要求, 同时电动机端子电压能够克服静阻转矩而正常起动。

在给定条件下, 《工业与民用配电设计手册》的公式计算结果如表4所示。

从表4可以看出, 电动机采用直接起动时, 母线电压能够满足规范要求, 但电动机不能克服静 (下转第74页)

- [2] 王峥, 刘创华, 魏珍, 等. 基于叠加定理和Aumann-Shapley法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 13-22.
- [3] 文跃秀, 黄瑞, 闵向东, 等. 基于网损分摊的两种潮流追踪法对比研究[J]. 陕西电力, 2012, 40(3): 47-51.
- [4] 杨极, 邓武军, 郭涌涛, 等. 电力市场下网损分摊策略综述[J]. 四川电力技术, 2005, 45(3): 48-51.
- [5] 伍期刚, 程浩忠, 刘梓洪. 边际网损系数法中的网损分摊调整方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 47(3): 78-81.
- [6] 周兴华, 杜松怀. 双边交易电力市场下基于核心理论的网损分摊方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 60-65.
- [7] 胡朝阳, 韩祯祥. 基于Shapley值的网损分摊新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 32-35.
- [8] 刘梓洪, 程浩忠, 刘晓冬, 等. 国外典型区域电力市场网损分摊方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 29-32.
- [9] Zhong Haiwang, Xia Qing, Wang Yang, et al. Dynamic economic dispatch considering transmission losses using quadratically constrained quadratic program method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2232-2241.
- [10] 王峥, 刘创华, 刘怡然, 等. 基于数据融合与拓扑分析的多阶段月度网损计算[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 61-67.
- [11] 王显花, 孙鹏, 李波, 等. 一种综合考虑全网和局部的网损优化方法[J]. 电气传动自动化, 2014, 36(5): 15-20, 24.
- (收稿日期: 2017-08-25) **EA**

(上接第62页)

表4 《工业与民用配电设计手册》方法电压相对值

序号	计算项	直接起动	软起动
1	m1母线电压相对值(%)	97.2	98.0
2	m2母线电压相对值(%)	90.0	92.8
3	电动机端子电压相对值(%)	79.2	86.1

阻转矩;采用软起动器起动时,母线压降、电动机端子压降均能够满足要求。这一结果与根据潮流分布计算判定的结果一致。

3 结束语

潮流分布计算是电力系统中非常成熟的算法,思路清晰,简单易懂。本文利用潮流分布算法来分析电动机起动时的复功率潮流分布,综合考虑有功、无功的共同影响,计算各负荷共同作用下的电压降落,概念直观,也不需推导大量公式。通过算例与《工业与民用配电设计手册》中的方法的计算结果对比显示,虽有误差,但基本不影响对起动方式的判断,从而验证了潮流分

布法的有效性。

本文仅在假定其他条件(如电缆选用)不变的情况下进行电压起动压降校验方法的探讨。事实上,除了考虑软起动器起动,还有其他的起动方式可供选择,或者增大电缆截面积来满足直接起动的条件。电动机选择哪种起动方式,受到电网容量、其他设备负荷、配电距离和保护成本等多种因素的影响,需综合考虑并经过合理的起动校验来判断其是否采用降压起动。

参考文献

- [1] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 中国航空工业规划设计研究院. 工业与民用配电设计手册[M]. 3版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 王明全. 低压电动机的起动计算和校验[J]. 建筑电气, 2005, 34(12): 13-20.

(收稿日期: 2017-06-02) **EA**