

# 容量比超 3 倍变压器的并列运行分析

刘建戈, 李 峰

(国网涟水县供电公司, 江苏 淮安 223400)

**摘 要:** 分析两台变压器接线组别、变比不同时并列运行产生的循环电流, 阻抗电压不同时并列运行的负载分配。根据两变电站的 20MVA 与 6.3MVA 的 35kV 变压器的参数, 计算阻抗电压偏差和并列运行时的负荷分配情况。通过现场实试验证了容量比超过 3 倍的变压器, 在满足接线组别、变比相同和阻抗电压偏差条件下可并列运行。

**关键词:** 变压器; 并列; 容量比; 循环电流

因负荷增长的原因, 对变电站其中变压器进行了增容改造, 使原先容量相等或相近的变压器会变成一大一小的情况。如变电站原有两台 6.3MVA 容量的变压器, 其中一台增容改造为 20MVA 容量的变压器, 两者的容量比超过了 3 倍。一个变电站内一大一小的变压器会带来运行方式调整和负荷释放的困难。

变压器增容改造过程中, 并不会涉及母线改造及出线间隔的调整, 通常每个变压器都供给的负荷基本相等的。在上述变电站中, 当负荷超过 20MVA 时, 需要两台变压器并列运行, 如果用大容量变压器单独运行时会造成超载, 分裂运行小容量变压器超载。由于存在变压器容量比超过 3 倍不能并列运行的不成文规定, 致使容量超 3 倍的两台变压器最大供电能力仅等于大容量的变压器。因此, 对于容量比超过 3 倍变压器的如果能并列运行, 可充分释放变压器容量提高利用率, 缓解供电瓶颈。

## 1 变压器并列运行条件分析

### 1.1 变压器并列运行条件

变压器的并列运行有许多优点, 但并非所有的变压器均能并列运行。变压器的并列运行的最佳情况是, 空载时变压器二次侧没有循环电流, 各变压器按容量大小比例分配负荷, 且负荷电流同相位。与相同容量变压器的并列运行一样, 采用不等容量变压器并列运行也应同时满足相应条件。

《电力变压器运行规程》中对变压器并列运行规定了 3 个条件<sup>[1]</sup>:

a) 接线组别号相同;

b) 变压器变比应相等, 差值不得超过  $\pm 0.5\%$ ;

c) 阻抗电压值偏差小于 10%。

其中并没有提到变压器容量比的规定, 同样电力行业对变压器的运行规程以及调度规程中, 关于变压器并列条件都没有涉及到容量比问题<sup>[2] [3] [4]</sup>。因此容量比超过 3 倍变压器的不能并列运行的说法, 需要分析和验证。

### 1.2 接线组别不同时变压器并列运行分析

接线组别不一致的变压器并列运行时, 会在变压器之间产生循环电流 $I_c$ :

$$I_c = \frac{\Delta U}{Z_{dl1} + Z_{dl2}} = \frac{U_{e1} - U_{e2}}{Z_{dl1} + Z_{dl2}} \quad (1)$$

式中:  $Z_{dl1}$ 、 $Z_{dl2}$ ——分别为 2 台变压器的阻抗;  $U_{e1}$ 、 $U_{e2}$ ——分别为 2 台变压器二次侧电压<sup>[5]</sup>。

以 2 台同容量相接组别分别为 Yyn0 和 Ydn11 的变压器为例, 二次线电压  $U_2$  大小相等, 相位差为  $30^\circ$ , 可求得合成电压的数值  $\Delta U = 2U_2 \sin 15^\circ = 0.518U_2$ 。

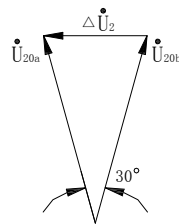


图 1 变压器二次线电压相位图

通常 35kV 变压器的阻抗电压在 5~10% 之间

[7], 两台变压器并列运行时, 以同电压等级、同容量为基准的阻抗电压标么值之各为 0.1-0.2。因此由(1)式可得

$$I_c = \frac{\Delta U}{Z_{d1} + Z_{d2}} = \frac{0.518}{0.1 \square 0.2} = 2.6 \square 5.18$$

在 30 度相位差电压作用下, 并列运行的变压器会在回路中也会出现 2.6-5 倍额定电流的循环电流。在相位差 180 度时电压差可达 2 倍额定电压, 可产生 10-20 倍的额定电流, 足以烧坏变压器。接线组别不同的变压器不能并列运行。

### 1.3 变比不同时变压器并列运行分析

若并列运行变压器的变比不等时, 在变压器二次电压也会产生电压差, 因而产生循环电流。当两台变压器容量相同时, 可用式(1)计算出循环电流  $I_c$ 。变压器容量不同时, 可用正式(2)计算循环电流  $I_c$ :

$$I_c = \frac{\Delta U \% I_{e1}}{U_{d1} \% + U_{d1} \% I_{e1} / I_{e2}} \quad (2)$$

式中  $\Delta U\%$  为电压差的百分比,  $I_{e1}$  为 1 号变二次侧额定电流,  $I_{e2}$  为 2 号变二次侧额定电流<sup>[6]</sup>。

以两台同容量变比相差 2.5% 的变压器计算循环电流,

$$I_c = \frac{\Delta U}{Z_{d1} + Z_{d2}} = \frac{0.025}{0.1 \square 0.2} = 0.12 \square 0.25$$

以两台容量相差 1 倍变比相差 2.5% 的变压器计算循环电流, 以小容量变压器参数为基准。

$$I_c = \frac{0.025 \times 1}{(0.05 \square 0.1) + (0.05 \square 0.1) / 2} = 0.17 \square 0.33$$

因此, 两台同容量的变压器并列运行时, 当相差一个档位时电压差为 2.5%, 循环电流可达额定电流的 12.5—25%; 相差 2 个档位电压差为 5% 时, 循环电流可达额定电流的 25—50%。当不同容量变压器并列运行时, 因变比产生循环电流对小容量变压器影响更大。循环电流不仅增大了变压器的损耗和发热量, 而且循环电流过大时还会造成变压器故障。

### 1.4 阻抗电压不同时变压器并列运行分析

接线组别相同和变比相等的变压器并列运行时, 如果阻抗电压不同, 会直接影响到变压器间负载的分配。如有 2 台阻抗电压不同的变压器并列运行, 第  $i$  台变压器负载分配系数  $D_i$  的计算表达式

为

$$D_i = \frac{S_{Ni} / U_{di} \%}{S_{N1} / U_{d1} \% + S_{N2} / U_{d2} \%} \quad (3)$$

式中  $S_{Ni}$  为第  $i$  台变压器的额定容量;  $U_{di}\%$  为第  $i$  台变压器的阻抗电压;  $S_{N1}$ 、 $S_{N2}$ 、 $U_{d1}\%$ 、 $U_{d2}\%$  为 1、2 号变压器的额定容量和阻抗电压<sup>[6]</sup>。

由式(3)可知, 变压器的负载分配系数与变压器容量和阻抗电压有关, 各台变压器分配负载系数之和应为 1。当变压器容量相同阻抗电压不同或容量大阻抗电压小时, 负载分配系数成反比, 阻抗电压小的变压器承担负载多。因此只有 2 台变压器的容量与阻抗电压比值相等时, 变压器所承担负载才能按其容量进行比例分配。

2 台变压器并列运行, 所承担负载容量取决于先达到满载的变压器。因此当 1 台变压器容量先满载时, 其最大允许容量<sup>[6]</sup> (能承担的总负载)  $S_{fi}$  为

$$S_{fi} = U_{di} \% \left( \frac{S_{N1}}{U_{d1} \%} + \frac{S_{N2}}{U_{d2} \%} \right) \quad (4)$$

式中  $S_{fi}$  为最大允许容量,  $S_{Ni}$  为第  $i$  台变压器的额定容量;  $U_{di}\%$  为第  $i$  台变压器的阻抗电压;  $S_{N1}$ 、 $S_{N2}$  为 1、2 号变压器的额定容量<sup>[6]</sup>。

规程要求两台变压器并列运行时, 阻抗电压偏差小于 10%。根据式(4)可计算出同容量情况阻抗电压偏差为 10% 时, 两台变压器并列运行运行时最大允许容量为总容量的 95%; 阻抗电压偏差为 20% 时, 最大允许容量为总容量的 91.5%。在容量相差一倍的两台变压器并列运行时, 阻抗电压偏差为 10%, 最大允许容量为总容量的 94%; 阻抗电压偏差为 20% 时, 最大允许容量为总容量的 83.3%。因此, 两台并列运行变压器阻抗电压偏差为 10% 以内时, 可充分释放负荷, 随着阻抗电压偏差的增加对总容量的利用率越低, 也就失去并列运行的意义。

## 2 容量比超 3 倍变压器并列运行分析

两台变压器的容量比超过 3 倍时, 能否并列运行? 虽然在规程中没有提及, 如果并列运行时没有循环电流、负荷电流同相位且按容量比例分配, 就可以并列运行。

变压器的容量不同会体现在阻抗电压的变化。

通常阻抗电压 6~10 千伏等级的电力变压器为 4~5.5%；35 千伏等级的电力变压器为 6.5~8%；110 千伏等级的电力变压器为 8~9%；220 千伏等级的电力变压器达 12~14%。容量增大时，变压器的阻抗电压相应增加。只要两台变压器的阻抗电压偏差小于 10%，无论容量比是否超过 3 倍，其他条件符合的情况下理论是可以并列运行的。下面以两座变电站变压器容量比超出 3 倍的情况进行分析计算。

2.1 变压器参数

甲乙两座变电站存在两台变压器容量比超过 3 倍的情况，都是一台 20MVA 和一台 6.3MVA 的变压器。其参数见表 1，

表 1 容量比超 3 倍的变压器参数

|   |     | 型号            | 容量<br>MVA | 短路<br>阻抗% | 电压组合            | 接线组<br>别 |
|---|-----|---------------|-----------|-----------|-----------------|----------|
| 甲 | 1 号 | SZ11-20000/35 | 20        | 7.78      | (35±4×2.5)/10.5 | Ynd11    |
|   | 2 号 | SZ9-6300/35   | 6.3       | 7.62      | (35±3×2.5)/10.5 | Ynd11    |
| 乙 | 1 号 | SZ9-6300/35   | 6.3       | 7.61      | (35±4×2.5)/10.5 | Ynd11    |
|   | 2 号 | SZ11-20000/35 | 20        | 8.35      | (35±3×2.5)/10.5 | Ynd11    |

根据相关公式计算阻抗电压偏差值，阻抗值和阻抗电压标么值，结果如表 2。

表 2 变压器阻抗参数计算

|   |      | 容 量<br>MVA | 阻 抗 电<br>压% | 阻抗电压偏<br>差值% | 阻 抗<br>Ω | 阻 抗 标<br>么 值 |
|---|------|------------|-------------|--------------|----------|--------------|
| 甲 | 1 号变 | 20         | 7.78        | 1.03         | 4.77     | 0.39         |
|   | 2 号变 | 6.3        | 7.62        | 1.03         | 14.82    | 1.21         |
| 乙 | 1 号变 | 6.3        | 7.61        | 4.6          | 14.8     | 1.21         |
|   | 2 号变 | 20         | 8.35        | 4.6          | 5.1      | 0.42         |

从计算结果看 35kV 甲变电站两台变压器的阻抗电压偏差值为 1.03%，乙变电站两台变压器的阻抗电压偏差值为 4.6%，均小于规程规定的 10%要求，符合规程中规定的变压器并列运行条件。

2.2 并列分析

变压器接线组别号不同或电压比偏差较大时，会在并列变压器之间有电压差，从而导致很大的环流，损坏变压器。阻抗电压值偏差不符合要求时，阻抗电压值偏小的变压器会“抢”负荷，负荷高峰时会先满载，阻抗电压值偏在的变压器负载轻，整体变压器容量利用率低。而对于不等容量变压器的容量比，一般不宜超过 3 倍是一直约定俗成。因为变压器的阻抗电压值是随着容量增加而增加大的，但容量比超过 3 倍时，并列变压器的阻抗电压值偏

差会出现大于 10%可能性会。

甲乙两站的变压器容量比虽然略大于 3，但阻抗电压值偏差小于 10%，是符合规程的并列运行条件。即使阻抗电压值偏差略大于 10%，如果不产生环流和不使任一台变压器重载，在负荷高峰期间并列运行也可短期内满足负荷需要。

根据式（3）计算甲乙两站变压器并列时负荷分配情况，每台变压器的负荷分配系数，不同负荷情况的负荷情况，

表 3 并列运行变压器负荷分配情况

|   |     | 容量<br>MVA | 占总容<br>量比 | 负荷分<br>配系数 | 80%负荷<br>MVA | 90%负荷<br>MVA | 95%负荷<br>MVA | 100%负<br>荷 MVA |
|---|-----|-----------|-----------|------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 甲 | 1 号 | 20        | 0.76      | 0.757      | 15.92        | 17.91        | 18.90        | 19.9           |
|   | 2 号 | 6.3       | 0.24      | 0.243      | 5.12         | 5.76         | 6.08         | 6.40           |
| 乙 | 1 号 | 6.3       | 0.24      | 0.257      | 5.40         | 6.08         | 6.42         | 6.76           |
|   | 2 号 | 20        | 0.76      | 0.743      | 15.64        | 17.6         | 18.54        | 19.5           |

从计算结果看，甲变两台变压器的阻抗电压偏差值 1.03%较小，负荷分配系数接近占每台变压器占总容量比；因此在 95%负荷时两台变压器都没有出现超载情况，而达到两台变压器总功率时，6.3MVA 的变压器出现了超载，20MVA 的变压器接近满载。乙变两台变压器的阻抗电压偏差值 4.6%较大，6.3MVA 的变压器负荷分配系数超过占总容量比明显，会“抢”负荷的情况；因此在 90%负荷时两台变压器都没有出现超载情况，而在 95%负荷时 6.3MVA 的变压器出现超载情况，20MVA 的变压器还未满载；达到两台变压器满功率时，6.3MVA 的变压器超载 7%，20MVA 的变压器接近满载。

根据式（4）可计算出保滩变两台变压器并列进最大允许容量为 25.89MVA，唐集变两台变压器并列进最大允许容量为 24.53MVA。为避免变压器满载，可按 95%负载率考虑，则保滩变两台变压器并列进 95%允许容量为 24.6MVA，唐集变两台变压器并列进最 95%允许容量为 23.3MVA。允许容量情况下变压器并列时负荷分配情况：

表 4 允许容量变压器负荷分配情况

|   |     | 容量<br>MVA | 占总容<br>量比 | 负 荷 分<br>配 系 数 | 最大允<br>许容量<br>MVA | 最大值<br>允 许<br>MVA | 90% 负<br>荷 MVA | 95% 负<br>荷 MVA |
|---|-----|-----------|-----------|----------------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|
| 甲 | 1 号 | 20        | 0.76      | 0.757          | 25.89             | 19.59             | 24.6           | 18.61          |
|   | 2 号 | 6.3       | 0.24      | 0.243          |                   | 6.3               |                | 5.99           |
| 乙 | 1 号 | 6.3       | 0.24      | 0.257          | 24.53             | 6.3               | 23.3           | 5.99           |
|   | 2 号 | 20        | 0.76      | 0.743          |                   | 18.22             |                | 17.32          |

综上计算情况，在上述负荷情况，甲变电站和乙变电站的变压器并列运行是理论上可行的。为进一步验证可行性，需要开展并列运行测试。

### 3 并列运行测试

甲变电站和乙变电站变压器并列运行测试，分别选择负荷较重时进行，并列正常情况下测试应不小于 1 小时。

#### 3.1 测试注意事项

在进行两台容量比超 3 倍的变压器并列运行前和测试过程中，就注意以下事项：

1) 两台变压器分列运行且运行正常，负荷满足测试要求，且无影响运行的缺陷；

2) 变压器保护配置正确，两侧能可靠动作，遥控分合正常；

3) 调整两台变压器档位，使两台变压器低压侧电压一致；并列运行期间，应防止变压器自动调档造成电压差形成环流，应临时封锁电压无功优化系统（VQC）调档。

4) 若因负荷变化需要调整电压的，在负荷允许的条件下，先分裂运行再调档，调档结束后再并列运行。负荷不满足条件时，升档时应先升 20MVA 的变压器，每次升压不超过 1 档，然后迅速升 6.3MVA 的变压器档位。降档时应先降 6.3MVA 的变压器，每次降压不超过 1 档，然后迅速降 20MVA 的变压器档位。

#### 3.2 测试步骤

1) 测试前 10 分钟内，运行人员对变压器进行红外测温并记录。

2) 合 10kV 母联开关，在变电站的运行人员注意观察变压器有无响声等异常现象，发现异常立即汇报调度拉开母联开关；调度员注意观察两台变压器两侧及 35kV 进线的电流和功率情况，分析进线潮流与变压器低压侧潮流是否平衡，当电流差值超过 20%时应拉开母联开关。

3) 并列运行期间，每隔 10 分钟调度员和运行人员分别记录两台变压器两侧及 35kV 进线的电流和功率。运行人员每 20 分钟对变压器进行红外测温并记录。

4) 并列运行 1 小时后，结束测试，恢复正常运行方式。

#### 3.3 测试数据及分析

变电站两台变压器电气接线如图 2 所示。其中

甲变电站 T1 变压器为 20MVA，T2 变压器为 6.3MVA；乙变电站 T1 变压器为 6.3MVA，T2 变压器为 20MVA。

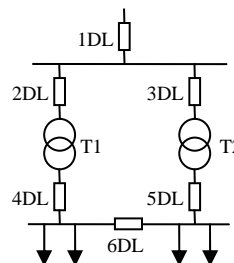


图 2 变压器电气接线图

变压器并列运行前后的视在电流、有功功率及温度测试数据如表 5、表 6 和表 7 所示。

表 5 并列运行前后测试电流数据

|   |     | 1DL<br>(A) | 2DL<br>(A) | 3DL<br>(A) | 4DL<br>(A) | 5DL<br>(A) | 6DL<br>(A) |
|---|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 甲 | 并列前 | 142.2      | 46.2       | 88.9       | 159.7      | 295.6      | 0          |
|   | 并列后 | 138.7      | 105.4      | 32.8       | 341.4      | 110.4      | 180.6      |
| 乙 | 并列前 | 69.4       | 36.1       | 3.6        | 131.3      | 58.5       | 0          |
|   | 并列后 | 60.2       | 15.3       | 44.8       | 55.8       | 164.1      | 35.6       |

表 6 并列运行前后有功功率数据

|   |     | 1DL<br>(MW) | 2DL<br>(MW) | 3DL<br>(MW) | 4DL<br>(MW) | 5DL<br>(MW) | 6DL<br>(MW) |
|---|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 甲 | 并列前 | 8.54        | 2.69        | 5.40        | 2.76        | 5.26        | 0           |
|   | 并列后 | 7.91        | 6.05        | 1.95        | 6.0         | 1.97        | 3.07        |
| 乙 | 并列前 | 4.26        | 2.32        | 2.13        | 2.29        | 2.2         | 0           |
|   | 并列后 | 3.62        | 0.98        | 2.87        | 1.0         | 2.91        | 0.62        |

表 7 并列运行前后变压器温度

|   |     | 并列前 | 并列后<br>15min | 并列后<br>30min | 并列后<br>45min | 并列后<br>60min |
|---|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 甲 | 1 号 | 26  | 27           | 27           | 27           | 27           |
|   | 2 号 | 28  | 32           | 32           | 32           | 32           |
| 乙 | 1 号 | 41  | 41           | 41           | 42           | 42           |
|   | 2 号 | 42  | 42           | 43           | 43           | 43           |

流经两台变压器高压侧的电流是负荷电流和循环电流的叠加，但二者方向不一致，当负荷较轻时，循环电流占主要部分，可近似认为负荷电流的方向与环流方向一致。流过 1 号变压器的负荷电流为  $I_{1th}$ ，循环电流为  $I_C$ ，流过变压器  $I_{1DL}$  可用下列公式表示<sup>[8]</sup>：

$$\begin{cases} I_{f1} + I_C = I_{DL} \\ I_{f2} - I_C = I_{2DL} \\ I_{f1} / I_{f2} = D_1 / D_2 \end{cases} \quad (5)$$

根据上式可分别计算出高低压侧的循环电流，其中甲变电站两台变压器并列后的 35kV 侧的循环电流为 0.78A，10 kV 侧的循环电流为 0.63A；乙变电站两台变压器并列后的 35kV 侧的循环电流为 0.15A，10 kV 侧的循环电流为 0.72A。循环电流的数值不到 1 A，可能是电流互感器或测量设备的误差，可以近似忽略不计。计算出来的测量结果与前面的理论分析相符，即并列运行的变压器接线组别和电压一致时不会产生循环电流。阻抗电压偏差影响负荷按容量分配，甲乙变电站各自两台变压器阻抗电压有一定偏差且容量比超出 3 倍，其实测负载分配系数如下

表 8 变压器实测负载分配系数

|   |     | 容量<br>MVA | 阻抗电<br>压% | 理论负载<br>分配系数 | 实 测 负 荷<br>(35kV 侧) MW | 实测负载<br>分配系数 |
|---|-----|-----------|-----------|--------------|------------------------|--------------|
| 甲 | 1 号 | 20        | 7.78      | 0.757        | 6.05                   | 0.756        |
|   | 2 号 | 6.3       | 7.62      | 0.243        | 1.95                   | 0.244        |
| 乙 | 1 号 | 6.3       | 7.61      | 0.257        | 0.98                   | 0.255        |
|   | 2 号 | 20        | 8.35      | 0.743        | 2.87                   | 0.745        |

变压器负载分配系数实测结果与理论计算结果最大相差千分之二，即 20MAV 负荷的分配误差在 40VA 以内，小于变压器的空载损耗。在并列运行后进行变压器同步测温工作，温度变化与正常承载负荷时一致，印证了并列运行时没有产生循环电流的结论。因此甲变电站在 25.89MVA 负荷时两台变压器可并列运行，乙变电站在 24.53MVA 负荷时两台变压器可并列运行。

4 结论

通过对变压器并列运行条件进行分析，以变压

器不产生循环电流和不过载为前提，对容量略 3 倍的两台变压器进行了计算和负荷实测。分析和实测结果表明，容量略超 3 倍的两台变压器在满足接线组别、电压和阻抗电压偏差的条件下是可以并列运行的。变压器容量比例的大小最终会表现在阻抗电压的偏差上，容量小的变压器阻抗电压小，在并列运行时会先满载。因此，在阻抗电压偏差小于 10% 的情况下，容量比超过 3 倍的变压器可并列运行。

参考文献

[1] DL/T 572—2010. 电力变压器运行规程[S].  
[2] 国家电网公司. (国家电网生技[2005]172 号) 110 (66) kV-500kV 油浸式变压器(电抗器)运行规程 [Z]. 2005.  
[3] 江苏省电力公司. (苏电调〔2012〕748 号) 江苏电网县级电力系统调控规程[Z]. 2012.  
[4] 江苏省电力公司. (苏电运检〔2014〕240 号) 35kV-500kV 变电站通用运行规程[Z]. 2014.  
[5] 胡景生. 电力变压器经济运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999, 78-86.  
[6] 刘照林. 不等容量变压器并列运行条件与经济运行方式的确定方法[J]. 山西电力, 2013(4): 40-43.  
[7] 任元会, 卞铠生, 姚家祯. 工业与民用配电设计手册 (第三版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005, 130.  
[8] 黄明华, 李红, 伏祥运, 衡思坤. 参数不同变压器并列运行时负荷分配计算[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(1): 52-55.

作者简介:

刘建戈 (1974—), 男, 江苏连云港人, 研究员级高级工程师, 从事电力系统自动化及电网运行管理工作;  
李 峰 (1983—), 男, 江苏连云港人, 工程师, 从事电网运行管理工作。