

УДК 621.313.322

А.И.ТИТКО, докт.техн.наук, Г.М.ФЕДОРЕНКО, докт.техн.наук (Институт электродинамики НАН Украины, Киев), А.П.ГРУБОЙ, В.И.ЧЕРЕДНИК (ГП з-д "Електротяжмаш", Харьков)

Электродинамические усилия в лобовых частях обмоток ротора и статора турбогенератора при переходных процессах в режимах самосинхронизации

Приведена методология расчета электродинамических усилий, которые действуют на токонесущие элементы, в т.ч. на обмотки ротора и статора генераторов при переходных процессах в динамических режимах. Проведен анализ действия таких сил на лобовые части обмоток ротора и статора генератора мощностью 250 МВт при неуспешном включении генератора в режимах синхронизации.

Наведено методологію розрахунку електродинамічних зусиль, які діють на струмонесучі елементи, у т.ч. на обмотки ротора і статора генераторів при перехідних процесах у динамічних режимах. Проведено аналіз дії таких сил на лобові частини обмоток ротора і статора генератора потужністю 250 МВт при неуспішному включенні генератора в режимах синхронізації.

Надежность работы электрогенерирующего оборудования на ТЭС и АЭС во многом зависит от его стойкости к динамическим режимам: пускам, остановам, режимам синхронизации и регулирования мощности и др.

При проектировании турбогенераторов важнейшим вопросом является расчет электродинамических усилий (ЭДУ), которые действуют на обмотки статора и ротора при переходных режимах, для обеспечения такого их крепления, которое способно обезопасить от разрушения в аномальных режимах. Расчету ЭДУ, прежде всего в обмотках статора и в номинальных режимах, посвящено много публикаций [3, 4, 5]. Как правило, это сложные расчеты, учитывающие действие сил во всех направлениях. В данной работе приведена методика расчета ЭДУ в обмотках статора и ротора в направлении по нормали к поверхности лобовых частей обмотки как наиболее опасных нагрузок при переходных процессах. Кроме того, для механических расчетов очень важно знать зависимость сил от времени, которая определяется режимом работы генератора.

Электродинамические усилия, как известно, равны векторному произведению плотности тока \vec{j} в проводящем элементе и индукции \vec{B} магнитного поля, действующего на этот элемент

$$\vec{j} = [\delta \vec{B}] \quad (1)$$

Если индукция магнитного поля измеряется в Тл, а плотность тока в А/м², то ЭДУ — в Н/м³.

Для токонесущих элементов с равномерным распределением плотности тока сила \vec{j} , с которой магнитное поле действует на проводник длиной l с током I , определяется так:

$$\vec{j} = I |l, \vec{B}|, \text{ Н/м} \quad (2)$$

Для расчета ЭДУ, действующих на лобовые части обмоток генератора, необходимо определить магнитное поле в концевой зоне. С этой целью была использована методика [6] для области определения, представленной на рис. 1, которая учитывает распределение плотностей токов в лобовых частях, наиболее адекватное пространственной геометрии стержней в данных частях обмоток [7].

При исследовании переходного процесса ограничимся периодической и аperiodической составляющими токов обмоток ротора и статора, как в случае симметричного внезапного короткого замыкания обмотки статора (ОС).

Мгновенный ток в фазе обмотки статора представляется в общем виде следующим образом [2, 8]

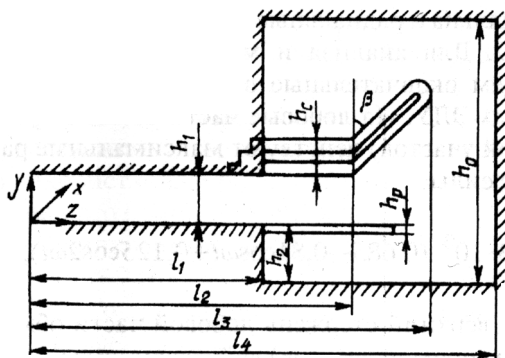


Рис. 1

$$i_c(t) = \left(i_{Псо} + \sum_{k=1}^m i_{Пск} e^{-t/T_{Пк}} \right) \cos \omega t - \left[i_{ac} + i_{1ac} \cos 2\omega t \right] e^{-t/T_a}, \quad (3)$$

где $i_{Псо}$ — амплитуда установившегося тока; $i_{Пск}$ — амплитуды периодических токов статора; i_{ac} — постоянная составляющая аperiodических токов статора; i_{1ac} — амплитуда токов двойной частоты; $T_{Пк}$, T_a — постоянные времени, обусловленные сопротивлениями контуров токов ротора и статора соответственно.

Выражение (3) действительно для фазы обмотки статора, ось которой совпадает с осью полюсов ротора в начале переходного процесса.

Токи обмотки ротора (ОР) представлены так:

$$i_p(t) = i_{op} + i_{ap} e^{-t/T_d} - i_{Пр} e^{-t/T_a} \cos \omega t, \quad (4)$$

где i_{op} — ток возбуждения перед началом переходного процесса; i_{ap} — аperiodическая составляющая токов ротора; $i_{Пр}$ — амплитудное значение периодического тока; T_d — постоянная времени, обусловленная сопротивлением эквивалентного контура тока в роторе.

Для каждой составляющей тока находятся отдельные составляющие, а в дальнейшем — суммарная индукция магнитного поля в области определения ЭДУ. В зависимости от режима работы генератора составляющие индукции магнитного поля, возбуждаемого обмотками ротора и статора, суммируются с учетом сдвига их намагничивающих сил в данном режиме. В режимах внезапного КЗ либо синхронизации, когда генератор находится без нагрузки, МДС обмоток приблизительно сдвинуты на 180° .

С учетом направления тока в проводящей детали либо стержнях обмоток ЭДУ действуют в различных направлениях. Они распределены по объему даже в стержнях обмоток, вследствие изменения, прежде всего, магнитного поля. Так, результаты расчета ЭДУ в лобовых частях обмоток статора ТГ показывают, что верхние стержни (ближе к точке статора) испытывают электродинамические нагрузки более значимые, чем нижние, в связи с

тем, что в области верхних стержней угол между векторами индукции магнитного поля, возбуждаемого в отдельности обмотками статора и ротора, острый, а в области нижних — тупой.

Проведем расчет ЭДУ в обмотках турбогенератора мощностью 250 МВт и исследуем их действие при неуспешном включении в режимах самосинхронизации, т.е. в случае, когда при включении угол между напряжениями генератора и сети оказывается большим и при этом наблюдается существенный бросок токов статора и ротора.

Основные исходные данные: номинальный ток статора 10 кА; ток ротора 3284 А; $\cos \varphi = 0,85$; угол нагрузки 66° ; амплитудное значение линейной нагрузки статора $A_c = 2,1 \cdot 10^6$ А/м; амплитудное значение линейной нагрузки обмотки ротора $A_p = 3,77 \cdot 10^6$ А/м; полюсные деления соответственно статора и ротора — $\tau_c = 2$ м, $\tau_p = 1,7$ м; угол наклона стержня лобовой части обмотки статора к торцевой поверхности сердечника в тангенциальном направлении $\alpha = 0,712$ [7]; длина вылета лобовой части обмотки ротора 0,48 м; длина прямого участка лобовой части обмотки статора составляет 0,17 м; высота стержня обмотки статора 0,078 м; высота обмотки ротора в лобовой части 0,1 м. Другие исходные данные: $h_1 = 0,0925$ м, $l_1 = 2,05$ м, $l_2 = 2,22$ м, $l_3 = 2,843$ м, $l_4 = 3,8$ м, $h_0 = 1$ м, $h_2 = 0,2$ м, $h_c = 0,175$ м, $h_p = 0,1$ м, $\beta = 0,56$ (рис. 1).

Находим ЭДУ, которые действуют по нормали к поверхностям обмотки. При этом принимается во внимание тангенциальная составляющая индукции магнитного поля как наиболее значимая. При расчете ЭДУ учитывается неравномерное распределение индукции по высоте стержней. Тогда, следуя (2), ЭДУ, действующие на прямой участок лобовой части ОС в радиальном направлении, будут рассчитываться из выражения

$$f_r = i_c B_\varphi, \quad (5)$$

где i_c — ток в стержне ОС, B_φ — тангенциальная составляющая индукции магнитного поля.

Для отогнутого участка лобовой части ОС рассчитываются аксиальная f_z и радиальная f_r составляющие сил (2), а нормальная составляющая — к поверхности обмотки находится из выражения

$$f_n = f_r \cdot \cos \beta + f_z \cdot \sin \beta \quad (6)$$

В номинальном режиме ЭДУ будут иметь постоянную составляющую, направленную в сторону сердечника статора, и переменную с частотой 2ω . Рассмотренный в работе подход основан на определении усредненного значения ЭДУ, действующего по нормали к поверхностям лобовых частей обмоток. При расчете сил в каждом конкретном стержне необходимо строго учитывать фазы характеристик найденного суммарного поля и тока этого стержня. В данной работе рассчитаны наиболее опасные уси-

лия, направленные в радиальном направлении либо в радиально-аксиальном для отогнутого участка лобовой части обмотки статора.

Расчет ЭДУ выполняется так. Сначала рассчитываются составляющие индукции магнитного поля по указанной методике и разработанной компьютерной программе в области стержней лобовых частей обмоток ротора и статора. При этом токи ротора и статора задаются для рассмотренного режима генератора с учетом сдвига фаз их МДС. Составляющие ЭДУ рассчитываются по формулам (2), (5), (6) для каждого из участков обмотки с учетом направления токов в данном участке. При переходных процессах составляющие индукции магнитного поля и ЭДУ находятся для каждой составляющей тока обмоток (3), (4) в отдельности, так как они имеют различную зависимость от времени. Усилия, действующие на участки стержней в лобовых частях обмоток, находятся как суперпозиция усилий, соответствующих составляющим переходных токов.

Тестовые расчеты в номинальном режиме показывают, что рассчитанные по приведенной методике значения усилий согласуются с приведенными в литературе [3].

Как известно [2,3], успешное включение генератора предполагает, что угол сдвига фаз генератора и сети не превышает 10^0 , а ток статора не превышает 3,5 номинального.

Были рассмотрены возможные режимы неуспешного включения генератора мощностью 250 МВт и найдены для такого режима токи ротора и статора [2]. Для варианта включения генератора при угле сдвига фаз генератора и сети, равном 120^0 , относительные значения токов статора составляют 6,5, токов ротора 4,2. Расчеты выполнены при таких значениях индуктивных параметров: $X'_d = 1,83$; $X''_d = 0,306$; $X'''_d = 0,242$; $r_a = 0,0019$ Ом; $r_f = 0,08$ Ом. Индуктивность сети принималась равной $X_c = 0,05$.

Расчет ЭДУ проводился без учета затухания отдельных составляющих токов (3), (4) во времени в предположении, что для каждой фазы обмотки статора существуют только аperiodическая и периодическая с частотой ω составляющие, т.е. когда x''_d близко к x'''_d . При этом предполагалось, что бандажное кольцо экранирует переменную составляющую индукции магнитного поля обмотки ротора и аperiodическую составляющую обмотки статора. Постоянное магнитное поле пронизывает вращающееся бандажное кольцо беспрепятственно. Это допустимо, так как толщина бандажного кольца составляет 10 см, а глубина проникновения равна приблизительно 6 см ($\rho = 0,76 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\mu = 1,1\mu_0$).

Силы, действующие на проводники лобовой части обмотки ротора, распределены по высоте проводника в связи с изменением магнитного поля в ее области. В области прилегания ОР на бочке ротора аксиальная составляющая магнитного поля

минимальна и радиальные ЭДУ здесь также минимальны. Для анализа и механических расчетов приведем окончательные выражения для максимальных ЭДУ. На лобовые части обмотки ротора (прямой участок) действуют максимальные радиальные силы

$$f_r = 13,8 \cdot 10^3 (0,685 - 0,81 \cos \omega t + 0,125 \cos 2\omega t), \text{ Н/м.} \quad (7)$$

На верхний стержень лобовой части обмотки статора (прямой участок) действуют силы

$$f_r = 6 \cdot 10^4 (0,812 - 0,95 \cos \omega t + 0,14 \cos 2\omega t), \text{ Н/м.} \quad (8)$$

На рис. 2 показан характер изменения во времени электродинамических усилий, которые действуют на прямые участки лобовых частей обмотки статора (кр.1) и ротора (кр.2). При рассмотренном переходном процессе на обмотки действуют циклические силы с периодом 0,02 с.

В момент $t = 0,01$ с максимальные усилия на лобовую часть обмотки ротора равны $22,1 \cdot 10^3$ Н/м. На лобовую часть обмотки статора в этот же момент времени действуют максимальные усилия $11,4 \cdot 10^4$ Н/м. Таким образом, участок длиной 0,17 м выдерживает удар в 2 т. Максимальные ЭДУ наблюдаются на выходе из пазов, где имеет место поле "выпучивания" из воздушного зазора. С учетом затухания переходных токов полученные значения сил во времени будут также затухать.

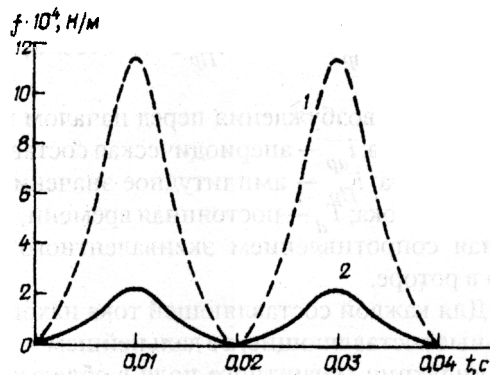


Рис. 2

Приведенные данные показывают, насколько велики переменные усилия, возникающие в режимах синхронизации при неуспешном включении. При противовключении генератора в режимах самосинхронизации, когда угол между напряжением сети и генератора становится равным 180^0 , приведенные значения ЭДУ приблизительно удваиваются.

Таким образом, неуспешное включение генератора при синхронизации приводит к существенным циклическим ЭДУ, которые действуют на лобовые части обмоток ротора и статора, вызывая вибрации. Максимальные усилия действуют на верхние стержни ОС при выходе их из паза, что

негативно отражается на изоляции стержней в данном месте, снижая ее ресурс и пробивное напряжение.

Оценим уровень вибраций в прямом участке лобовой части обмотки статора на выходе из пазов. Вибрации будем рассчитывать по методике, изложенной в [1]. Максимальные нагрузки на медный стержень в этом участке обмотки

$$\sigma = \frac{M_{\text{изг}}}{W} = \frac{ql^2 \cdot 6}{2bh^2} \quad (9)$$

Здесь $M_{\text{изг}}$ — изгибающий момент, кг·см, $M_{\text{изг}} = 0,5ql^2$, q — интенсивность распределенной нагрузки, кг/см, l — длина стержня, на который действует нагрузка, см, b — ширина стержня, см, h — высота стержня, см, W — момент сопротивления стержня, см³, равный $W = bh^2/6$.

Перемещение стержня на краю от приложенных сил

$$\delta = \frac{ql^4}{8Fbh^3} = \frac{ql^4 \cdot 12}{8Fbh^3},$$

где E — модуль упругости, кг/см²; I — момент инерции стержня, см⁴.

В данном случае на медный стержень действует нагрузка в виде электродинамических усилий, максимальная интенсивность которых вычисляется по формуле (8), и в момент времени $t = 0,01$ с равна 114 Н/м.

Подставив в формулы (9), (10) соответствующие значения величин, получим такие расчетные значения:

$$\sigma = \frac{114 \cdot 17^2 \cdot 6}{2 \cdot 5 \cdot 9^2} = 244 \text{ кг/см}^2,$$

$$\delta = \frac{14 \cdot 17^2 \cdot 12}{8 \cdot 1 \cdot 10^6 \cdot 2,5 \cdot 5,8^3} = 0,0292 \text{ см} = 292 \text{ мкм}.$$

А нормальной считается вибрация 40 мкм, откуда следует, что ток статора не должен превышать значения примерно 3,5 номинального, что соответствует принятым нормам [2].

Резонансная частота для рассмотренного участка стержня составляет около 87 Гц. Таким образом, в рассмотренном режиме ЭДУ, действующие на прямой участок лобовой части обмотки статора, обуславливают вибрации, частота которых выше

резонансной, но они повышенные и достаточные, чтобы привести к механическому повреждению изоляции стержней на выходе из пазов и к ослаблению крепления, в т.ч. к смещению прессующих клиньев.

Систематические неуспешные включения при синхронизации являются нежелательными в связи с повышенными циклическими усилиями, действующими на лобовые части обмоток статора и ротора, и нарастающими с каждым последующим включением вибрациями.

Таким образом, электродинамические усилия, действующие на лобовые части обмоток ротора и статора при неуспешных включениях в режимах синхронизации генератора, когда ударные токи статора в 3,5 выше номинального, нежелательны, так как они приводят к нарастающим вибрациям и ослаблениям креплений лобовой части обмотки статора, а повышенные вибрации прямого участка лобовой части — к снижению электрофизических свойств и уменьшению пробивного напряжения изоляции стержней обмотки на выходе из пазов, где эти усилия максимальны.

1. *Беляев Н.М.* Сопротивление материалов. — М.: Наука, 1956. — 856 с.
2. *Вольдек А.И.* Электрические машины. — Л.: Энергия, 1974. — 840 с.
3. *Глебов И.А., Данилевич Я.Б.* Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. — 183 с.
4. *Карацуба Л.Н., Карацуба А.С.* Электродинамические усилия, действующие между несущими ток линейными конечными скрещивающимися проводниками. // Проблемы технической электродинамики. — 1977. — Вып. 63. — С. 54—58.
5. *Пиккульский В.А., Хуторецкий Г.М., Цветков В.А.* Электродинамические усилия в лобовых частях обмоток статора мощных турбогенераторов. // Электричество. — 1984. — № 5. — С. 21—24.
6. *Счастливы Г.Г., Титко А.И., Ладиков-Роев П.Ю.* Решение электромагнитного поля в экранах и нажимных плитах турбогенераторов с обычным и криогенным охлаждением. — В кн.: Криогенная электродинамика и энергетика. К.: Наук. думка, 1977. — С. 68—75.
7. *Титко А.И., Счастливы Г.Г.* Математическое и физическое моделирование электромагнитных полей в электрических машинах переменного тока. — Киев: Наук. думка, 1976. — 200 с.
8. *Титко А.И.* Нестационарное электромагнитное поле в мощных турбогенераторах // Электричество. — 1984. — № 4. — С. 49—53.

Надійшла 18.07.08