

УДК 620.192: 621.317.32.015.34

ОСОБЕННОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТОК СТАТОРОВ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ, ВКЛЮЧЕННЫХ В СЕТЬ

Ба Бораик А.М., Усачев А.Е., Кубарев А.Ю., Маргулис С. М.

Казанский государственный энергетический университет

Резюме: В работе сообщается о результатах исследования особенностей наблюдения частичных разрядов (ЧР) в статоре турбогенератора (ТГ) ТВФ-60-2 при его работе в сети. Показывается, что для правильной интерпретации результатов измерения ЧР в ТГ необходимо знать схему соединения стержней различных ветвей фазных обмоток и порядок их расположения в пазах статора; схемы их пересечения в лобовых частях и распределение напряжения по стержням в пазовой и лобовой части ТГ. Вследствие того, что последовательно соединённые стержни статорной обмотки имеют различный потенциал относительно земли, условия возникновения ЧР в каждом стержне в пазовой и в лобовой части существенно различаются, а фаза возникновения ЧР становится неоднозначным параметром.

Ключевые слова: частичные разряды, турбогенератор, распределение напряжения, стержень, фаза возникновения и контроль состояния изоляции.

FEATURES OF MONITORING PARTIAL DISCHARGE IN THE STATOR WINDING INSULATION OF TURBINE GENERATORS, INCLUDED IN THE NETWORK

A.M. Baboraik, A.E. Usachev, A.Y. Kubarev, S.M. Margulis

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

Abstract: In this paper reports the results of studies of the surveillance of partial discharge (PD) in the stator the turbine generator (TG) TVF-60-2 when its work on the network. Shown that, for a correct interpretation of the measurement results PD in TG, it is necessary to know winding diagram and the order of their location in the stator slots; circuit crossing them in the end-winding and the stress distribution at the bars in the slot and end-winding part of the TG. Consequently, series-connected stator bars potentially different relative to the ground, the conditions of occurrence of PD in each bar in the slot and end-winding part are substantially different and the phase of occurrence of PD becomes ambiguous parameter.

Keywords: partial discharge, turbine generator, voltage distribution, bar, phase of occurrence and control of insulation condition.

Введение

Турбогенератор (ТГ) является основным элементом электроэнергетических систем и электрических станций. Контролю состояния изоляции ТГ во всем мире уделяется большое внимание, разрабатываются новые и совершенствуются старые методы контроля. Одним из успешных и повсеместно используемых методов контроля состояния изоляции ТГ является метод измерения частичных разрядов (ЧР) в обмотках статора ТГ. Измерение ЧР дает возможность обнаруживать слабые и повреждённые места изоляции стержней статора на ранней стадии их развития. Это позволяет своевременно провести их устранение при проведении профилактических и ремонтно-восстановительных работ [1–3]. Диагностика ТГ

методом частичных разрядов, как правило, осуществляется через регулярные промежутки времени как в отключенном, так и в рабочем состоянии. Измерения ЧР в отключенном состоянии ТГ проводятся при запланированных отключениях в соответствии с графиком периодического осмотра и ремонта. Измерение ЧР в ТГ при их работе в сети эффективно используется для анализа тенденций изменения интенсивности ЧР и оптимизации сроков проведения плановых отключений [1]. Главными факторами, влияющими на характеристики ЧР, являются следующие: нагрузка ТГ, состояние системы охлаждения и окружающей среды (влажность, загрязнение), индивидуальные особенности конструкции и дизайна генератора [2–5].

В настоящее время все проблемы с изоляцией обмотки статора электрической машины в современной литературе по ЧР в ТГ принято относить к трем основным зонам [2–5] (рис. 1.):

1. Пазы пакета статора, где частичные разряды возникают на участке изоляции «фаза—земля» и «фаза—фаза», т.е. между стержнями обмотки и сталью пакета статора или же между двумя стержнями обмотки, принадлежащими разным фазам обмотки.

2. Участок выхода стержня обмотки статора, где разряды возникают на участке изоляции «фаза—земля». Здесь разряды возникают на фазном напряжении и чаще всего обусловлены проблемами полупроводящего покрытия в изоляции стержня.

3. Лобовые части стержня обмотки статора, где частичные разряды возникают на участке изоляции «фаза—фаза». Здесь они всегда возникают под воздействием линейного напряжения между фазами обмотки.

В соответствии с [5] именно в этих зонах или максимально близко к этим местам следует монтировать первичные датчики частичных разрядов.

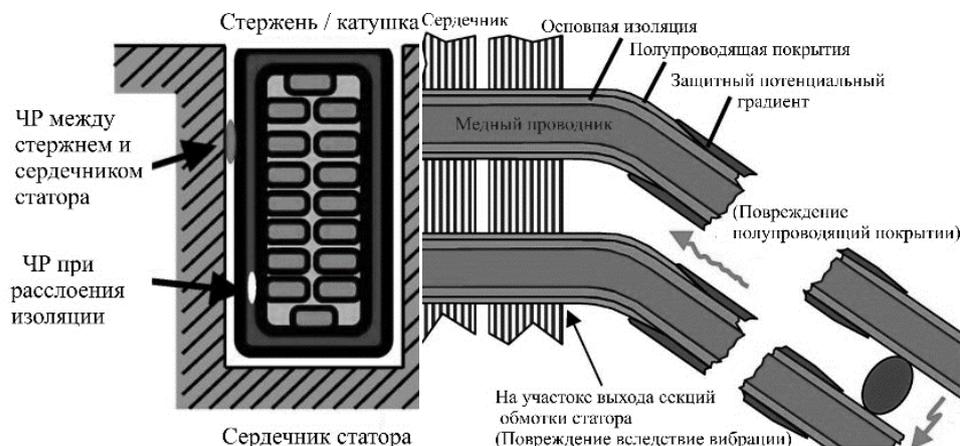


Рис. 1. Типичные частичные разряды в статорах турбогенераторов

В настоящей работе, на основании учёта схемы соединений стержней статора, проведён расчёт распределения напряжения как между стержнями и землёй, так и между стержнями в ТГ марки ТВФ-60-2. Такой расчёт позволил более детально провести анализ возможных мест возникновения ЧР. При проведении анализа учитывались реальные размеры ТГ, параметры изоляции стержней в пазовой и лобовых частях ТГ, порядок следования стержней в ветвях и фазах, возможные пересечения стержней разных фаз в лобовых частях.

Распределение напряжения в пазовой части обмотки статора турбогенератора ТВФ-60-2

Турбогенератор ТВФ-60-2 имеет номинальное напряжение $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ, 72 паза статора с двумя стержнями в каждом пазу, каждая из фаз имеет две параллельные ветви, состоящие из 24 последовательно соединённых стержней, соединение фаз – «звезда», число выводов: линейных – 6, нулевых – 3. При симметричной нагрузке общая точка «звезды» (нулевые выводы обмоток) имеет нулевой потенциал относительно земли, а амплитудное значение напряжения на каждом из 6 линейных выводов равно $U_{\text{амл.фаз}} = \frac{U_{\text{ном}} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 8,57$ кВ. Поскольку каждая ветвь каждой фазы состоит из 24 последовательно соединённых стержней, то напряжение на каждом стержне относительно земли будет зависеть от того, какой порядковый номер имеет этот стержень, если последовательно нумеровать стержни от нулевых или от линейных выводов. Например, стержень, примыкающий к нулевому выводу, в начале будет иметь нулевой потенциал, а в конце $U_1 = \frac{U_{\text{амл.фаз}}}{24} \approx 360$ В. Напряжение в стержнях относительно земли в различных пазах ТГ показано на рис. 2.



Рис. 2. Распределение напряжения в пазовой части ТВФ-60-2

На рис. 2 прямоугольниками обозначены стержни фазы А; треугольниками с вершиной вниз – фаза В, а треугольниками с вершиной вверх – фаза С. Заполненные фигуры означают, что стержень является нижним, а незаполненные фигуры соответствуют верхним стержням паза. Например, в пазе №1 находится два стержня фазы А: верхний, который соединён с линейным выводом, и нижний, имеющий максимальное напряжение относительно земли 5 кВ. В пазе №7 нижний стержень относится к фазе С ($U \sim 8,2$ кВ), а верхний – к фазе А ($U \sim 4,2$ кВ). Полное фазное напряжение относительно земли имеет место только в 6 пазах (№№ 1, 6, 25, 30, 49, 54), в которых стержни соединены с линейными выводами. В шести пазах (№№ 13, 18, 37, 42, 61, 66) стержни соединены с нулевыми выводами обмоток ТГ. Они имеют напряжение относительно земли, равное нулю ($0 \div 360$ В). Остальные стержни ТГ имеют различные значения максимального напряжения в диапазоне $0,5 \div 8,2$ кВ. Очевидно, что ни о каком фазном напряжении относительно земли в пазовой части ТГ, как это упоминается в работах [4, 5], нельзя говорить, поскольку в разных пазах напряжение между стержнем и землёй различается в широком диапазоне.

В связи с таким распределением напряжения по стержням в пазах ТГ становится неоднозначным термин фаза ЧР. Термин фаза ЧР возник как иное представление термина напряжения возникновения ЧР. Действительно, если амплитудное значение напряжения

(U_0) во всех частях объекта, в котором наблюдаются ЧР, одинаково, а напряжение изменяется по закону $U=U_0\sin(\omega t)$, то фаза колебания, при которой возникает ЧР, однозначно связана с напряжением и является характеристикой ЧР. В случае наблюдения ЧР в ТГ значение U_0 в различных стержнях объекта наблюдения ЧР (турбогенератора) изменяется, как показано выше, в широком диапазоне. Даже определив фазу, при которой возникает ЧР, нельзя определить напряжение возникновения ЧР, поскольку место возникновения, а значит и стержень и U_0 , являются неизвестными величинами.

Пусть у нас имеется дефект, от которого наблюдаются ЧР, а напряжение возникновения ЧР в таком дефекте изоляции равно $U_{чр} = 6$ кВ. Используя полученное распределение напряжения относительно земли (рис. 2), можно определить фазу возникновения ЧР, если такой дефект возникает в каком-либо стержне в пазовой части ТГ. На рис. 3 показаны значения фазы напряжения, при которой наблюдался бы ЧР от такого дефекта в соответствующем стержне и пазе.

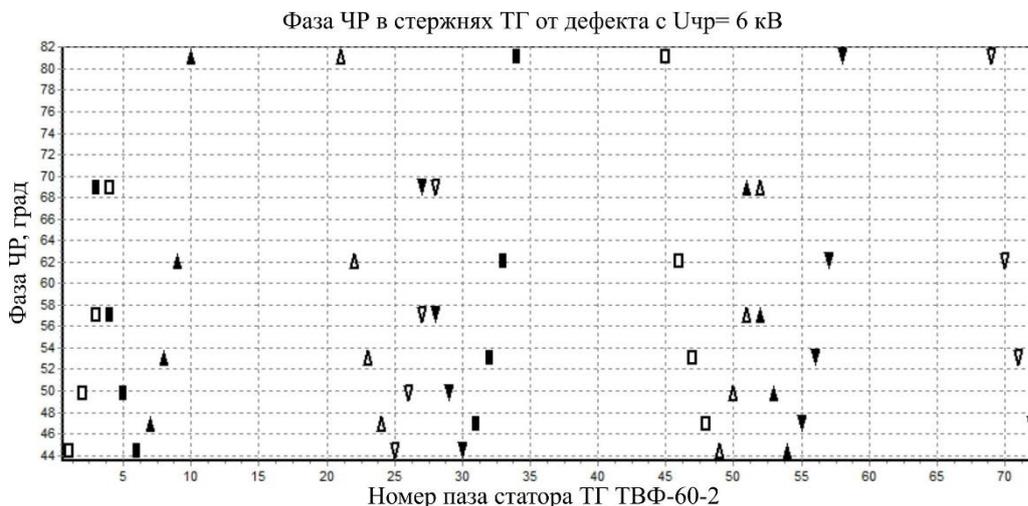


Рис. 3. Фазовый угол, при котором возникнет ЧР от дефекта с $U_{чр} = 6$ кВ

Условные обозначения стержней соответствуют обозначениям рис. 2, а фазовый угол отсчитывается от нуля соответствующей фазы. Если дефект с $U_{чр} = 6$ кВ возникает, например, в верхнем стержне паза 3, у которого $U_0=7,1$ кВ, то фаза ЧР будет равна 58° . ЧР от такого же дефекта в нижнем стержне паза 3 будет наблюдаться при фазе 69° , поскольку для верхнего стержня $U_0=6,4$ кВ. Если подобный дефект возникает в стержнях пазов 11÷20, 35÷44 и 59÷68, то он не будет наблюдаться ни при каком значении фазы, поскольку для стержней этих пазов $U_0 < 6$ кВ. Поскольку при фиксации ЧР в ТГ мы не знаем место возникновения дефекта, то фаза ЧР перестаёт быть однозначной характеристикой. Соответственно теряет смысл и другая характеристика – средняя мощность ЧР. На основе многолетнего опыта контроля состояния ТГ методом частичных разрядов в работе [6] предлагается отказаться и от такой характеристики, как величина кажущегося ЧР, которая широко используется при диагностике состояния изоляции других объектов. Хотя фаза ЧР и не является однозначной характеристикой отдельного частичного разряда, для контроля состояния всего ТГ можно предложить следующую оценку. Если считать, что напряжение возникновения ЧР снижается при развитии дефектов [7], картина развития дефектов в ТГ должна быть следующей. При высоких значениях $U_{чр}$ частичные разряды должны наблюдаться вблизи фазовых углов 90° и 270° для каждой фазы напряжения. По мере увеличения дефектов и снижения $U_{чр}$ фазовые углы должны сдвигаться в сторону меньших значений и расширяться диапазон их величин. Таким образом, можно использовать

увеличение диапазона фаз ЧР как диагностический признак развития дефектов в изоляции ТГ.

Поскольку в одном пазу могут находиться стержни разных фаз, то представляет интерес провести анализ всех возможных напряжений между стержнями в различных пазах. Распределение напряжения между стержнями в различных пазах показано на рис. 4.

Максимальное значение напряжения между стержнями возникает в пазах с номерами 7, 24, 31, 48, 55 и 72. Оно равно 11 кВ, что меньше амплитудного значения междуфазного напряжения, которое равно 14,85 кВ. Для изоляции стержней в одном пазу в ТГ ТВФ-60-2 используются 3 пластинки фольгированного стеклотекстолита общей толщиной 7 мм. С учётом полупроводящего покрытия миканитовой изоляции [8] вероятностью возникновения ЧР непосредственно между стержнями в одном пазу, даже с напряжением 11 кВ между стержнями, можно пренебречь. Пока не произошло полное сквозное разрушение фольгированного покрытия прокладок, ЧР будет происходить между стержнем и металлом статора, т.е. землёй.

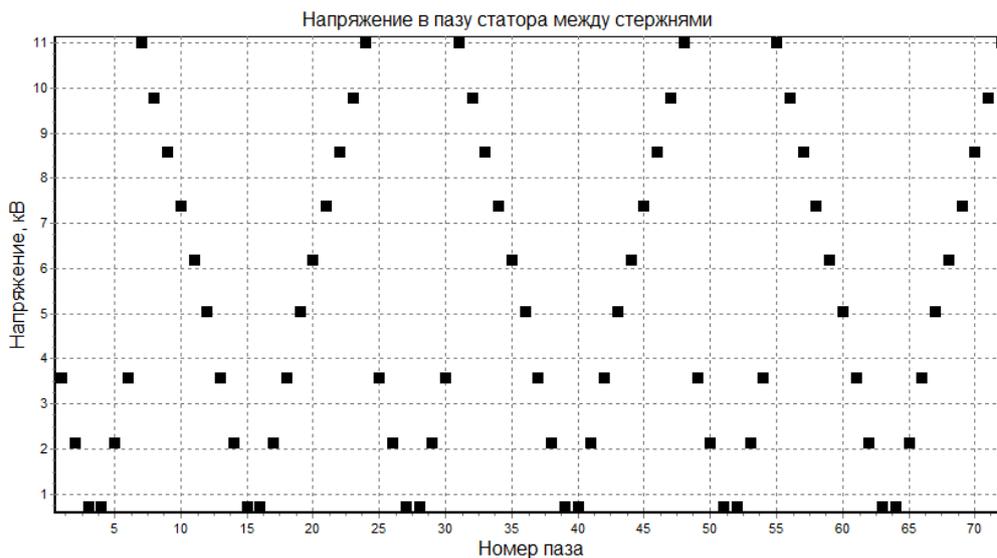


Рис. 4. Напряжение в пазах между верхним и нижним стержнями статора ТГ марки ТВФ-60-2

Распределение напряжение в лобовой части обмотки статора ТВФ-60-2

В работах [5,6] утверждается, что ЧР в лобовой части ТГ относятся к неклассическим частичным разрядам, и они располагаются в зоне фазовых углов ± 30 градусов относительно «классических» импульсов частичных разрядов, т.е. в зонах 15, 75, 195 и 255 градусов.

В лобовых частях ТВФ-60-2 каждый из 144 стержней пересекается с 28 (29) стержнями, выходящими из других пазов статора. Поскольку напряжение между каждым стержнем и землёй было определено (рис. 2), были определены также напряжения между всеми пересекающимися стержнями. Всего таких точек пересечения в ТВФ-60-2 имеется $144 \cdot 28 = 4032$ точки. Напряжение между верхним стержнем, выходящим из паза 1, и пересекающимися с ним нижними стержнями из других пазов показано на рис. 5.

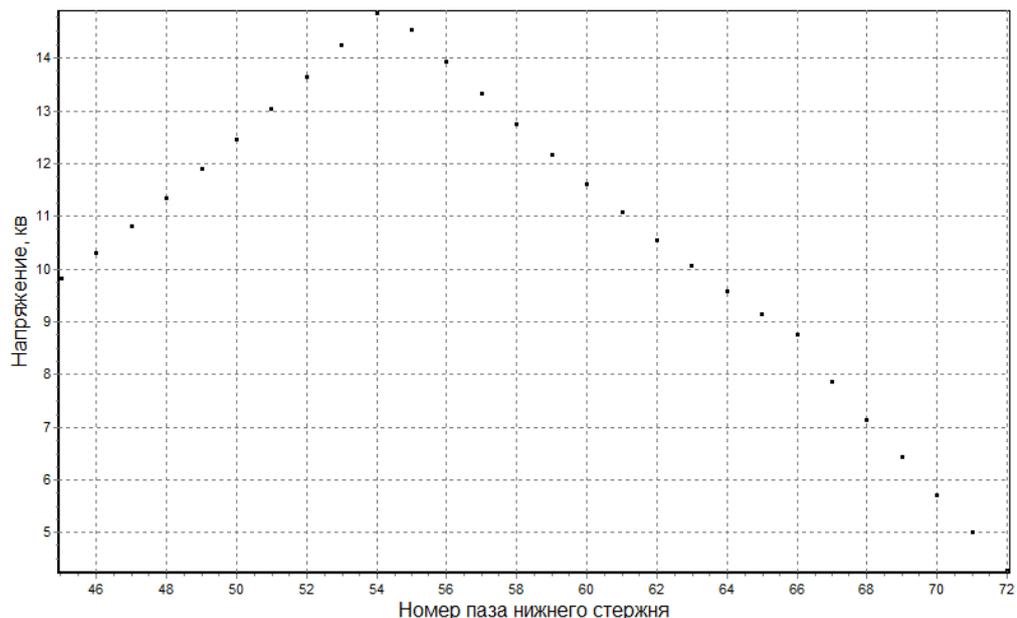


Рис. 5. Напряжение в лобовой части ТГ между верхним стержнем, выходящим из паза 1, и нижними стержнями из других пазов, пересекающимися с ним

Наибольшее напряжение 14,85 кВ возникает при пересечении с нижним стержнем из паза 54. Для каждого из верхних стержней пазов были построены такие графики напряжений в точках пересечения. Всего было построено 72 графика для напряжений в точках пересечения верхних и нижних стержней, аналогичных графику представленному на рис. 5. Кроме этого, были построены ещё 72 графика, аналогичных графику рис. 5, но для напряжений в точках пересечения нижних стержней и пересекающих их верхних стержней. Линейное напряжение 14,85 кВ было только в 3 точках пересечения. Для общего представления о напряжениях, которые возникают между стержнями в различных точках их пересечения в лобовой части, 72 отдельных графика были объединены в один график (рис. 6). На нём показаны напряжения в точках пересечения верхних стержней, выходящих из соответствующего паза с номерами 1 ÷ 72 и пересекающимися их нижними стержнями.

При таком представлении данных все символы, соответствующие напряжениям в точках пересечения стержней в лобовой части (например, соответствующие рис. 5), располагаются на одной вертикальной линии с соответствующим номером паза верхнего стержня. Информация о том, к каким точкам пересечения относится конкретный символ, в этом случае теряется. По этой причине информация, представленная на рис. 6, носит общий характер обо всех возможных напряжениях в лобовых частях ТГ, а данные о напряжениях в конкретных точках пересечений содержатся в графиках типа рис. 5.

Максимально возможное амплитудное значение междуфазного (линейного) напряжения имеет место для верхнего стержня из паза 1 (фаза А) при пересечении его с нижним стержнем из паза 54 (фаза С). Две другие пары с линейным напряжением между стержнями: верхний из 25 паза (фаза В) – нижний из 6 паза (фаза А) и верхний из 49 паза (фаза С) – нижний из 30 паза (фаза В). Поскольку в точках пересечения стержней в лобовой части имеет место широкий диапазон напряжений от 0 до 14,85 кВ, говорить о том, что в лобовой части ЧР происходит под действием линейного напряжения 14,85 кВ, просто некорректно. Из рис. 6 видно, что наиболее опасные места для возникновения ЧР в лобовой части — это пересечения верхних стержней из пазов 1, 25, 49 с нижними стержнями. Следует отметить, что среднее расстояние между стержнями в лобовых частях ТГ редко

снижается до 15 мм и менее. Эти воздушные промежутки, в совокупности с миканитовой изоляцией и полупроводящим покрытием поверх изоляции, делают вероятность ЧР из-за напряжения между стержнями достаточно низкой. При нормальном состоянии полупроводящего покрытия, оно экранирует излучение от ЧР в лобовых частях и снижает вероятность появления «быстрых» ЧР [9, 10]. Большое число перенаведённых ЧР из других фаз может служить сигналом о разрушении полупроводящего покрытия в лобовых частях ТГ. Утверждение о неклассическом типе ЧР в лобовой части и приписание ЧР с зонами фазовых углов 15, 75, 195 и 255 градусов, приведённое в [2, 6] противоречит проведённому нами анализу распределения напряжений в ТГ.

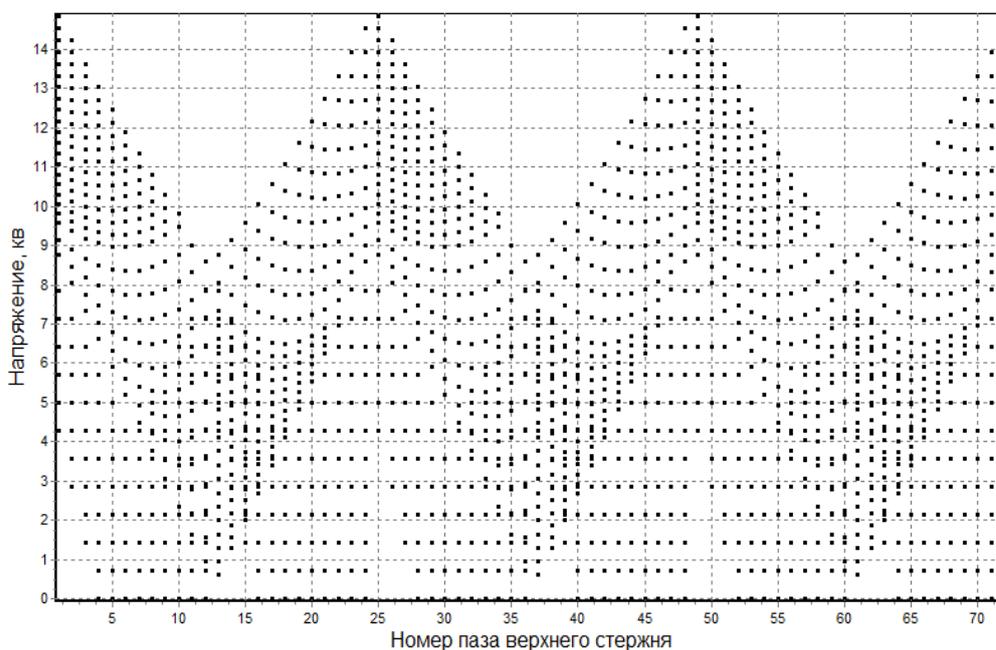


Рис. 6. Напряжение между верхними стержнями в лобной части ТГ, пересекающимися с нижними стержнями из других пазов

Заключение

На основании детального рассмотрения распределения напряжений в ТГ ТВФ-60-2 можно сделать следующие заключения:

1. Напряжение в пазах статора между стержнем и землей зависит от порядкового номера стержня, отчитываемого от нулевых или фазных выводов в цепочке последовательно-соединённых стержней фазы, и изменяется от 0 до амплитудного значения фазного напряжения.

2. Условия возникновения и фаза ЧР в пазах статора зависит от схемы соединения стержней в ТГ и различны для разных пазов. Существуют пазы, в которых ЧР между стержнем и землей не могут возникнуть. Существуют пазы с максимальной вероятностью ЧР.

3. ЧР от одинаковых по размерам дефектов, у которых равны напряжения возникновения ЧР, в разных стержнях в пазовой и лобовой части ТГ должны наблюдаться при различных значениях фазового угла.

4. В разных точках пересечения стержней в лобовой части ТГ имеют место значительные различия напряжений. Говорить о том, что в лобовых частях ЧР происходят из-за линейного напряжения и приписывать им определённые зоны фазовых углов, некорректно.

5. Расстановку внутренних датчиков состояния изоляции обмотки статора ТГ следует производить в областях с повышенной вероятностью возникновения ЧР.

Литература

1. HutterW. Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines//IEEE Electrical Insulation Magazine. -1992. -V.8. – No.3. – pp. 21-32.
2. ГОСТ ИЕС/TS 60034-27. Машины электрические вращающиеся. Часть 27. Измерения частичного разряда на изоляции статорной обмотки включенных в сеть вращающихся электрических машин М: Изд-во Стандарты. 2015. 55 с.
3. ИЕС/TS 60034-27. Rotating electrical machines – part 27: off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines. 2006-12-01. p 120.
4. HoofM.,LanzS. PD Diagnostics on Rotating Machines Possibilities and Limitations // Electrical Insulation Conference - Cincinnati, USA. - Oct.1999 - pp. 195-200.
5. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного электрооборудования / В.А. Русов. Екатеринбург: УрГУПС, 2011. 367с.
6. Interpretation of PD results - on-line testing – Version 3.2 Iris QMS 08/10.Ver. 3.2. 2008.
7. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико - Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
8. GregC. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani. Electrical insulation for rotating machines design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair / by GregC. Stone[and others]- Canada: IEEE Press Editorial Board,2003.- 390 p.
9. Pemen, August J.M. Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators/by August J.M. Pemen. Eindhoven :TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2000.- 177 p.
10. A. Pemen,P. Van Der Laan,W. de Leeuw. Propagation of partial discharge signalsin stator windings of turbine generators//IEEE Transactions on Energy Conversion -2006.21(1) pp. 155 -161.

Авторы публикации

Ба Бораик Абдулрахман Мохаммед – магистр техники и технологии, аспирант кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: baboraik_4@mail.ru.

Усачев Александр Евгеньевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru.

Кубарев Артём Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

Маргулис Сергей Михайлович – канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Электрические станции» (ЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. HutterW. Partial Discharge Detection in Rotating Electrical Machines//IEEE Electrical Insulation Magazine. -1992. -V.8. – No.3. – pp. 21-32.
2. Standard: IEC/TS 60034-27-2. Rotating electrical machines. Part 27-2. On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines// Publisher Standart, 2015.– 55 p.

3. IEC/TS 60034-27. Rotating electrical machines – part 27: off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines. 2006-12-01. p 120.

4. Hoof M., Lanz S. PD Diagnostics on Rotating Machines Possibilities and Limitations // Electrical Insulation Conference - Cincinnati, USA. - Oct.1999 - pp. 195 -200.

5. Rusov V. A. Measurement of partial discharges in the insulation of high-voltage electrical equipment /by V. A.Rusov – Ekaterinburg: USURT,2011.–367 p.

6. Interpretation of PD results - on-line testing – Version 3.2 Iris QMS 08/10.Ver. 3.2. 2008.

7. Vdoviko V.P. Partial discharges in high-voltage equipment diagnosing/by V.P. Vdoviko–Novosibirsk:Nauka, 2007. - 155 p.

8. Greg C. Stone, Edward A. Boulter, Ian Culbert, Hussein Dhirani. Electrical insulation for rotating machines design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair / by Greg C. Stone [and others] - Canada: IEEE Press Editorial Board,2003.- 390 p.

9. Pemen, August J.M. Detection of partial discharges in stator windings of turbine generators / by August J.M. Pemen. Eindhoven :TechnischeUniversiteit Eindhoven, 2000. - 177 p.

10. A. Pemen,P. Van Der Laan, W. de Leeuw. Propagation of partial discharge signals in stator windings of turbine generators // IEEE Transactions on Energy Conversion -2006.21(1) pp. 155 -161.

Authors of the publication

Ba Boraik Abdulrahman Mohammed - Master of engineering and technology, graduate student of "Electric stations" (ES), Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: baboraik_4@mail.ru

Usachev Alexander Evgenyevich is the Dr. physical. - a mat. Sciences, Professor of Department. "Electric stations" of Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: aleksandr_usachev@rambler.ru

Kubarev Artyom - PhD, associate professor of "Electric stations" (ES), Kazan State Power Engineering University (KGEU). E-mail: artemkubarev@yandex.ru.

Margulis Sergei Mikhailovich - PhD, Head of Department of "Electric stations" (ES), Kazan State Power Engineering University (KGEU).

Поступила в редакцию

10 января 2017 г.