УДК 621.592.00

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРМОНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ СТАНЦИЙ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКАМИ ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

*А.Ю. Ковалев 1, Е.М. Кузнецов2, В.В. Аникин1*

1 Нижневартовский филиал Омского государственного технического университета, г. Нижневартовск, Россия.

2 Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия.

Установки электроцентробежных насосов (УЭЦН) реализуют один из основных способов насосной эксплуатации нефтедобычных скважин. В связи с этим при рассмотрении вопросов электромагнитной совместимости необходим анализ гармоник тока и напряжения на входе и выходе станции управления погружным электронасосом.

*Ключевые слова* Погружной электродвигатель, спектральный состав, станция управления (СУ), анализатор качества электроэнергии.

В последнее время наблюдается интенсивное внедрение в УЭЦН регулируемого электропривода на базе преобразователей частоты (ПЧ) с широтно-импульсной модуляцией [1,2]. Применение преобразователей частоты в составе СУ УЭЦН позволяет:

* снизить нагрузки на электрическую сеть и обеспечить экономию электроэнергии в УЭЦН до 40 % от общего электропотребления погружными установками такого рода;
* реализовать плавный пуск и останов УЭЦН, энергосберегающее регулирование производительности при изменении дебита скважины;
* обеспечить управление широким классом ПЭД как отечественного, так и зарубежного производства мощностью до 500−600 кВт;
* устранить негативное влияние большого пускового тока на электродвигатель и ударных механических нагрузок, сопутствующих прямому пуску;

$ -$ увеличить объем добычи нефти без замены оборудования путем повышения частоты питающего напряжения выше 50 Гц;

Основным побочным эффектом широкого внедрения ПЧ в УЭЦН является генерирование высших гармонических составляющих токов и напряжений на шинах СУ УЭЦН. Экспериментальные исследования высших гармоник проводились на действующей скважине № 118 (куст 32) механизированной добычи нефти Ермаковского месторождения (рис. 1). Система электроснабжения, связи и автоматики этой скважины представляет собой электротехнический комплекс, содержащий наземное и погружное электрооборудование. К наземному силовому электрооборудованию относятся комплектная трансформаторная подстанция наружной установки (КТПН), станция управления (СУ) серии «Электон-05» и промысловый трансформатор типа ТМПНГ 250/3. Электроснабжение куста скважины осуществляется по воздушной линии (ВЛ) напряжением 6 кВ. Погружное электрооборудование УЭЦН состоит из многоступенчатого электроцентробежного насоса типа ЭЦН-5-125-1700, электродвигателя типа ПЭД-57-117 и длинной кабельной линии. Источником высших гармонических составляющих напряжения в узле нагрузки сети 0,4 кВ является СУ «Электон - 05».



Рис. 1 Схема исследования скважины 118 Ермаковского месторождения

Силовой канал СУ имеет двухступенчатую структуру (6-ти пульсный мостовой выпрямитель с емкостным фильтром – трехфазный автономный инвертор напряжения). Для регистрации несинусоидальных токов и напряжений проведена серия измерений на входных и выходных шинах СУ УЭЦН, а также на кабельной заделке устьевой арматуры скважины (рис. 1). При измерениях использован анализатор качества электрической энергии серии АКЭ-823, который разработан на основе Windows CE. Анализатор имеет математическое обеспечение для первичной обработки результатов измерений. Результаты математической обработки осциллограмм трехфазных токов и напряжений, полученных с помощью трех систем измерений, представлены в табл. 1

Таблица1

Гармонический состав токов и напряжений в фазе А

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Гармонический состав 1 система измерений | Гармонический состав 2 система измерений | Гармонический состав 3 система измерений |
| Номер гармоники, n | U, % | I, % | Номер гармоники, n | U, % | I, % | Номер гармоники, n | I, % |
| 1 | 100 | 100 | 1 | 100 | 100 | 1 | 100 |
| 2 | 0 | 3.51 | 2 | 7.38 | 1.07 | 2 | 0.43 |
| 3 | 0 | 0.88 | 3 | 0.39 | 1.38 | 3 | 0.94 |
| 4 | 0 | 1.85 | 4 | 8.13 | 0.88 | 4 | 0.45 |
| 5 | 2.56 | 41.27 | 5 | 6.3 | 3.52 | 5 | 3.76 |
| 6 | 0 | 0.64 | 6 | 2.6 | 0.48 | 6 | 0 |
| 7 | 1.43 | 18.05 | 7 | 4.44 | 1.02 | 7 | 0.74 |
| 8 | 0 | 0.27 | 8 | 7.45 | 0.26 | 8 | 0.31 |
| 9 | 0 | 1.17 | 9 | 0.91 | 0 | 9 | 0 |
| 10 | 0 | 0.45 | 10 | 6.7 | 0 | 10 | 0 |
| 11 | 1.02 | 6.54 | 11 | 16.67 | 0.97 | 11 | 0.94 |
| 12 | 0 | 0.37 | 12 | 1.75 | 0 | 12 | 0 |
| 13 | 0.3 | 3.14 | 13 | 15.09 | 0.49 | 13 | 0.51 |
| 14 | 0 | 0 | 14 | 4.65 | 0 | 14 | 0 |
| 15 | 0 | 1.03 | 15 | 0.85 | 0 | 15 | 0 |
| 16 | 0 | 0.4 | 16 | 4.87 | 0 | 16 | 0 |
| 17 | 0.43 | 3.32 | 17 | 6.52 | 0.33 | 17 | 0.39 |
| 18 | 0 | 0.23 | 18 | 1.23 | 0 | 18 | 0 |
| 19 | 0.35 | 1.47 | 19 | 3 | 0 | 19 | 0 |
| 20 | 0 | 0.26 | 20 | 2.43 | 0 | 20 | 0 |
| 21 | 0 | 0 | 21 | 1.21 | 0 | 21 | 0 |
| 22 | 0 | 0.21 | 22 | 1.92 | 0 | 22 | 0 |
| 23 | 0.46 | 2.06 | 23 | 3.8 | 0 | 23 | 0 |
| 24 | 0 | 0 | 24 | 1.01 | 0 | 24 | 0 |
| 25 | 0.39 | 1.16 | 25 | 3.12 | 0 | 25 | 0 |
| 26 | 0 | 0.29 | 26 | 1.08 | 0 | 26 | 0 |
| 27 | 0 | 0.23 | 27 | 1.01 | 0 | 27 | 0 |
| 28 | 0 | 0 | 28 | 1.59 | 0 | 28 | 0 |
| 29 | 0.35 | 1.27 | 29 | 4.74 | 0 | 29 | 0 |
| 30 | 0 | -0.24 | 30 | 0.83 | 0 | 30 | 0 |
|  |
| Окончание табл. 1 |
| Гармонический состав1 система измерений | Гармонический состав2 система измерений | Гармонический состав3 система измерений |
| 31 | 0.35 | 0.74 | 31 | 2.56 | 0 | 31 | 0 |
| 32 | 0 | 0 | 32 | 1.09 | 0 | 32 | 0 |
| 33 | 0 | 0 | 33 | 0.67 | 0 | 33 | 0 |
| 34 | 0 | 0.21 | 34 | 0.35 | 0 | 34 | 0 |
| 35 | 0.33 | 0.85 | 35 | 1.34 | 0 | 35 | 0 |
| 36 | 0 | 0 | 36 | 0.56 | 0 | 36 | 0 |
| 37 | 0.33 | 0.5 | 37 | 1.15 | 0 | 37 | 0 |
| 38 | 0 | 0 | 38 | 0.98 | 0 | 38 | 0 |
| 39 | 0 | 0 | 39 | 0.79 | 0 | 39 | 0 |
| 40 | 0 | 0 | 40 | 0.81 | 0 | 40 | 0 |
| 41 | 0.28 | 0.65 | 41 | 1.62 | 0 | 41 | 0 |
| 42 | 0 | 0 | 42 | 0.93 | 0 | 42 | 0 |
| 43 | 0.3 | 0.35 | 43 | 1.98 | 0 | 43 | 0 |
| 44 | 0 | 0 | 44 | 1.33 | 0 | 44 | 0 |
| 45 | 0 | 0 | 45 | 1.52 | 0 | 45 | 0 |
| 46 | 0 | 0 | 46 | 1.24 | 0 | 46 | 0 |
| 47 | 0.27 | 0.44 | 47 | 0.91 | 0 | 47 | 0 |
| 48 | 0 | 0 | 48 | 1.13 | 0 | 48 | 0 |
| 49 | 0.28 | 0.32 | 49 | 1.86 | 0 | 49 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 50 | 0.59 | 0 | 50 | 0 |
| 51 | 0 | 0 | 51 | 2.08 | 0 | 51 | 0 |
| 52 | 0 | 0 | 52 | 1.02 | 0 | 52 | 0 |
| 53 | 0.22 | 0.31 | 53 | 1.59 | 0 | 53 | 0 |
| 54 | 0 | 0 | 54 | 1.13 | 0 | 54 | 0 |
| 55 | 0.25 | 0.25 | 55 | 3.05 | 0 | 55 | 0 |
| 56 | 0 | 0 | 56 | 0.73 | 0 | 56 | 0 |
| 57 | 0 | 0 | 57 | 1.64 | 0 | 57 | 0 |
| 58 | 0 | 0.24 | 58 | 2 | 0 | 58 | 0 |
| 59 | 0 | 0 | 59 | 0.9 | 0 | 59 | 0 |
| 60 | 0 | 0 | 60 | 0.93 | 0 | 60 | 0 |
| 61 | 0.24 | 0 | 61 | 1.48 | 0 | 61 | 0 |
| 62 | 0 | 0 | 62 | 1.78 | 0 | 62 | 0 |
| 63 | 0 | 0 | 63 | 0.77 | 0 | 63 | 0 |
| 64 | 0 | 0 | 64 | 5.21 | 0 | 64 | 0 |

Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K\_{U }$ в сети 0,4 кВ (на вводе СУ) составляет 3,59%, и не превышает нормально допустимой величины (8%) [3]. Наибольшие коэффициенты n-х гармонических составляющих напряжения $K\_{UN}$наблюдаются у нечетных гармоник не кратных трем. Гармонические составляющие напряжения кратные трем отсутствуют.

Спектр входного тока СУ содержит в основном характерные для 6-ти пульсного мостового выпрямителя гармонические составляющие низших порядков (3, 5, 7, 11, 13), задаваемые формулой

$h=kq\mp 1,$(1)

в которой $h-$ порядок гармонической составляющей, $k-$ любое целое число, $q-$ пульсность выпрямителя. Коэффициент гармоник тока $K\_{I}$ составляет 46,1% и превышает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в 12,8 раза, Хотя коэффициент $K\_{I}$ в электрической сети 0,4 кВ не нормируется, но очевидно, что такой гармонический состав входного тока СУ приводит к увеличению потерь активной мощности и напряжения в КТП 6/0,4 кВ и в кабельной линии, соединяющей СУ с трансформатором ТМГ-630. Можно показать, что дополнительные потери мощности в ТМГ-630 от действия гармоник тока при идентичных параметрах всех скважин куста 32 пропорциональны в относительных единицах $K\_{I}^{2}$, т.е. составляют 21,2%, что весьма существенно.

Гармонический анализ несинусоидальных токов и напряжений на входе 0,4 кВ промыслового трансформатора типа ТМПНГ 250/3, полученных 2-й системой измерения, выделяет 64 гармоники напряжения и только 17 гармоник тока. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения $K\_{U }$ на вводе промыслового трансформатора типа ТМПНГ 250/3 составляет 71,45% и превышает нормально допустимое значение в 8,9 раза [3]. Изоляция первичной обмотки промыслового трансформатора работает в сложной электромагнитной обстановке, обусловленной гармоническим воздействием.

Коэффициенты n-х гармонических составляющих напряжения, кроме 3-ей гармоники, превышают свои нормально допустимые значения. Наибольший коэффициент 11-й гармоники (16,67%) превышает допустимое значение (3,5%) в 4,76 раза, а наименьший коэффициент 34-й гармоники (0,35%) превышает допустимое значение (0,2%) в 1,75 раз. Коэффициент гармоник тока $ K\_{I}$ нагрузки промыслового трансформатора составляет 6,46%. Этот коэффициент меньше суммарного коэффициента гармоник напряжения в фазе А в 11,06 раза.

Третьей системой измерений регистрировался ток нагрузки погружного электродвигателя типа ПЭД 56-117. Высшие гармонические составляющие напряжения в этой точке сети 2 кВ с достаточной точностью представления можно оценить по результатам измерения 2-й системы. Коэффициент гармоник тока $ K\_{I}$ в сети 2 кВ составляет в фазе А 6,06%.

Широкий спектр высших гармоник напряжения на выходе СУ обусловливает высокие значения производных $dU/dt, $вызывающих волновые электромагнитные процессы в погружной кабельной линии (ПКЛ) и приводящих к возникновению опасных перенапряжений на клеммах погружного электродвигателя. Из-за несогласованности ПКЛ и погружного электродвигателя в кабельной линии возникают стоячие волны напряжения, в результате чего напряжение в электродвигателе может повыситься до двукратного значения [1]. Кроме того, высокие скорости изменения напряжения приводят к появлению емкостных токов на всех паразитных емкостях, которые распределены в силовом канале передачи электроэнергии на вал двигателя. Эти явления сокращают ресурс УЭЦН из-за преждевременного выхода изоляции двигателя и ПКЛ из строя, перегрева трансформатора ТМПН, появления дополнительного механического износа подшипников и других конструкционных деталей УЭЦН.

В связи с этим, для повышения надежности и экономичности работы установки механизированной добычи нефти из глубинной скважины №118 рекомендуется подавить воздействие полигармонических выходных напряжений СУ на электрооборудование и сеть с помощью дросселей переменного тока, моторных дросселей, синусных фильтров и других специальных технических средств [4].

Библиографический список

1. Ковалев, А.Ю. Электротехнологически установки для нефтедобычи : монография / А.Ю. Ковалев, Е.М. Кузнецов, В.В. Аникин; Минобрнауки России, ОмГТУ; НОУ ВПО «АИПЭ», − Омск: Изд-во ОмГТУ, 2015. – 160 с.

 2. Белоусенко, И. В. Новые технологии и современное оборудование
в электроэнергетике газовой промышленности / И. В. Белоусенко [и др.]. − М. : Недра − Бизнесцентр, 2007. − 478 с.

 3. ГОСТ 32144-2013. Межгосударственный стандарт Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (ЕN 50160:2010, NEQ). – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.

 4. Данилов, Г.А. Повышение качества функционирования линий электропередачи / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников; под ред. В.П. Горелова и В.Г. Сальникова.- Новосибирск : НГАВТ, 2013. 559 – с.