

- В предыдущем номере журнала («Новости ЭлектроТехники» №1(43) 2007) обсуждалась проблема повышения точности настройки дугогасящих реакторов 6–35 кВ. Мы продолжаем знакомить наших читателей с современными решениями в этой области.

Сегодня авторы из Германии представляют новый метод (алгоритм) определения параметров нулевой последовательности сети путем инъекции (ввода) двух частот, отличных от 50 Гц. На основе определенных параметров может быть принято решение о настройке дугогасящего реактора и выявлен факт наличия на присоединении однофазного замыкания через значительное переходное сопротивление.

ДУГОГАСЯЩИЕ РЕАКТОРЫ 6–35 кВ

Новый метод определения параметров сети

Gernot Druml, компания A-eberle GmbH, Нюрнберг, Германия
Olaf Seifert, Университет технологии, Дрезден, Германия

Настройка дугогасящего реактора (ДГР) – превентивная операция, которая всегда выполняется в сети при отсутствии однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). Существующие методы настройки дугогасящих реакторов не позволяют определить параметры сети при наличии в ней ОЗЗ. Местоположение ОЗЗ и переходное сопротивление в месте повреждения неизвестны, измерить их невозможно. В случае металлического замыкания напряжение естественной несимметрии на нейтрали и ток непосредственно в месте повреждения также нельзя измерить. Ток нулевой последовательности может быть измерен только на шинах подстанции или распределительного пункта.

В прошлом были разработаны различные алгоритмы управления ДГР 6–35 кВ. Большинство из них основаны на необходимости перемещения плунжера (перестройки) ДГР. Развитие современных распределительных сетей характеризуется, с одной стороны, ростом доли кабельных линий с симметричными параметрами, что определяет малое напряжение естественной несимметрии, с другой стороны – увеличением влияния токов нагрузки на напряжение на нейтрали.

Малое напряжение на нейтрали требует высокой чувствительности регулятора реактора. Вследствие влияния токов нагрузки, напряжение на нейтрали может изменяться при каждом изменении нагрузки, вызывая запуск настройки реактора, который сам по себе в большинстве алгоритмов связан с физическим перемещением плунжера.

Таким образом, наличие возмущений в напряжении на нейтрали существенно затрудняет определение параметров сети, вызывает перемещение плунжера реактора и иногда даже приводит к неверной настройке. Электропривод плунжерного реактора рассчитан на небольшое число перемещений в день. Частые запуски и длительные циклы настройки вызывают более быстрый его износ.

Учитывая всё вышесказанное, требовалось найти метод определения параметров нулевой последовательности сети для правильной настройки ДГР в условиях малого напряжения естественной несимметрии, наличия помех и требуемого малого числа запусков привода.

ПОМЕХИ ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ

Используя упрощенный эквивалентный контур резонансно заземленной сети [1], изображенный на рис. 1, достаточно просто найти резонансную точку сети даже при условии малого напряжения естественной несимметрии.

Однако задача определения резонансной точки существенно осложняется наличием в напряжении на нейтрали возмущений. Вследствие этого регулятору сложно различить реальную резонансную точку и мнимые точки, вызванные возмущениями (подробнее – в [1]).

СУЩЕСТВУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В настоящее время для настройки дугогасящих реакторов 6–35 кВ используются следующие алгоритмы (относительное изменение напряжения на нейтрали используется в качестве критерия выявления коммутационной операции в сети):

Поиск максимума напряжения на нейтрали $|U_{NE}|$

В соответствии с этим алгоритмом ведется поиск максимума напряжения на нейтрали. Улучшенные версии такого алгоритма определяют дополнительно параметры сети (активную проводимость на землю), используя $\sqrt{2}$ метод [1]. Альтернативные алгоритмы используют метод наименьших квадратов для оценки параметров сети, используя часть резонансной кривой.

Метод наименьших квадратов на базе измерения $|1/U_{NE}|$

Меньшая чувствительность к возмущениям может быть достигнута, используя алгоритм, основанный на инвертированной резонансной кривой [1].

Метод окружности

Такой метод основан на том, что окружность может быть построена по трем точкам. При этом третья точка окружности – начало координат на комплексной плоскости. Небольшая расстройка, необходимая при реализации такого алгоритма, достигается включением емкости параллельно ДГР. Измеряя амплитуду и угол напряжения на нейтрали, можно построить окружность по трем точкам и определить по ней резонансную настройку.

Инъекция тока 50 Гц в нейтраль сети

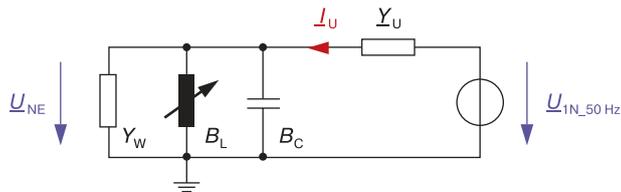
Этот алгоритм основан на инъекции тока 50 Гц в нейтраль сети. Влияние естественного небаланса может быть частично компенсировано использованием дифференциальных измерений в двух позициях с разницей во времени. Определить параметры сети позволяет информация о позиции ДГР и уравнение:

$$Y_{Cl} = \frac{dI_{Cl}}{dU_{NE}} \approx Y_w + j(B_c - B_L). \quad (1)$$

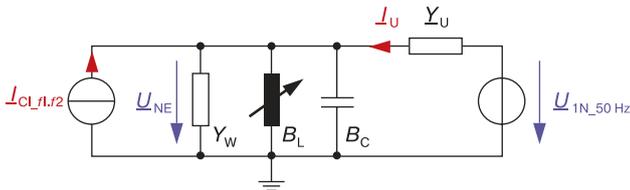
НОВЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Все существующие алгоритмы основаны на том факте, что напряжение на нейтрали возникает вследствие естественного небаланса (несимметрии параметров сети на землю) или из-за инъекции в нейтраль тока 50 Гц. Они предполагают, что в течение периода расчета (от нескольких секунд до нескольких минут) в сети не возникает изменения нагрузки и небаланса, им вызываемого. Реально же зачастую эти допущения не соблюдаются. В качестве примера можно привести сети металлургических комбинатов с резкопеременной нагрузкой.

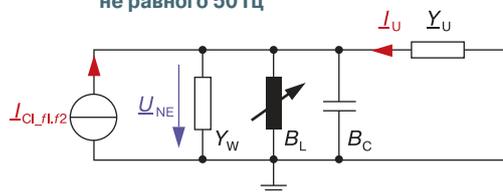
■ Рис. 1. Эквивалентный контур для резонансно заземленной сети



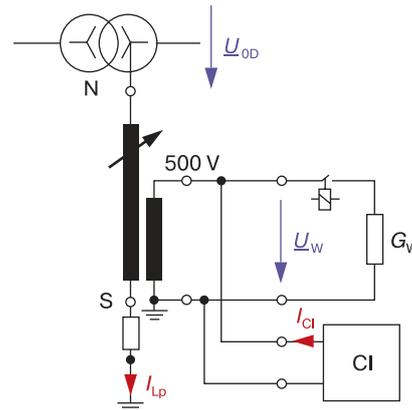
■ Рис. 2. Упрощенная схема замещения трехфазной сети с устройством инжекции тока



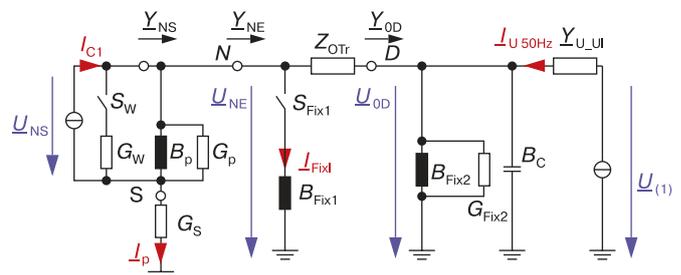
■ Рис. 3. Эквивалентный контур для инжекции тока, не равного 50 Гц



■ Рис. 4. Дугогасящий реактор с устройством инжекции тока CI и шунтирующим резистором G_W



■ Рис. 5. Схема замещения сети с инжекцией тока в нейтраль, шунтирующим резистором и ступенчатыми реакторами



Новый CIF алгоритм (Control by Injecting Frequencies) нечувствителен к изменениям нагрузки за счет использования для измерения и оценки параметров сети частот, не равных 50 Гц. Упрощенная эквивалентная схема замещения трехфазной сети с устройством инжекции тока в нейтраль приведена на рис. 2. Для частот, не равных 50 Гц, эта схема преобразуется к виду рис. 3. Для частоты f_n проводимость на зажимах источника тока инжекции определяется как:

$$Y_{CL_{fn}} = \frac{I_{CL_{fn}}}{U_{NE_{fn}}} = Y_U + Y_W + j \left(\omega_n C - \frac{1}{\omega_n L} \right). \quad (2)$$

Для симметричных сетей с малым значением Y_U формула (2) может быть переписана в виде:

$$Y_{CL_{fn}} = \frac{I_{CL_{fn}}}{U_{NE_{fn}}} \approx Y_W + j \left(\omega_n C - \frac{1}{\omega_n L} \right). \quad (3)$$

Используя две разных частоты f_1 и f_2 , можно получить систему двух комплексных уравнений с тремя переменными. Решения системы:

$$Y_W = \operatorname{Re} \left[\frac{I_{f1}}{U_{NE_{f1}}} \right], \quad (4)$$

$$C = \frac{\operatorname{Im}(Y_{CL_{f1}}) \cdot \omega_1 - \operatorname{Im}(Y_{CL_{f2}}) \cdot \omega_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2}, \quad (5)$$

$$L = \frac{1}{\omega_1 \cdot (-\operatorname{Im}(Y_{CL_{f1}}) + \omega_1 C)}. \quad (6)$$

Метод инжекции двух частот позволяет выполнить измерение параметров сети за время порядка 0,24 с в зависимости от используемых частот и алгоритмов фильтрации.

Основные преимущества нового CIF алгоритма:

- быстрота измерения;
- работоспособность в высокосимметричных сетях;
- способность определять суммарную индуктивность ДГР, включенных в сети;
- нечувствительность к ошибке в измерении напряжения на нейтрали с помощью обмоток ТН, соединенных в треугольник;
- нечувствительность к помехам, связанным с изменением нагрузки.

В зависимости от резонансной кривой и характера эксплуатации сети существуют дополнительные требования к устройству инжекции тока:

- инжектируемый ток должен быть переменной по амплитуде величиной для адаптации к потерям в различных состояниях сети (в малых сетях потери невелики и инжектируемый ток не должен превышать порог чувствительности защит от замыканий на землю; в то же время, если в сети возможно возникновение больших расстройек, малый инжектируемый ток не создаст надежно измеряемого напряжения $U_{NE_{fn}}$);
- инжектируемый ток не должен содержать 50-Гц компоненту;
- используя инжекцию тока с переменными частотами, возможно выбрать частоты так, что они будут близки к резонансной частоте сети, при этом малый инжектируемый ток создаст напряжение на нейтрали, достаточное для измерения величины.

С точки зрения длительности работы устройства инжекции тока возможны два различных подхода. Первый заключается в том, что инжекция тока запускается на короткое время по факту относительного изменения напряжения на нейтрали. Второй подход предполагает постоянную работу устройства инжекции тока и применяется в высокосимметричных сетях. Возможна также комбинация этих двух подходов, когда инжекция тока запускается через определенные промежутки времени (например, каждые 10 мин) для оценки параметров сети.

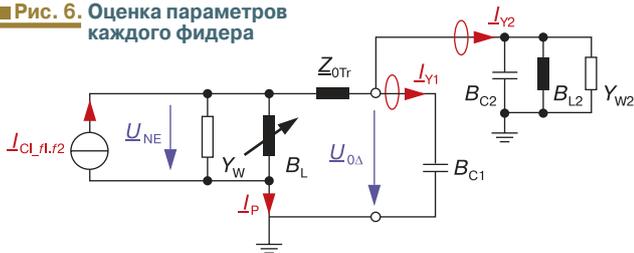
На рис. 4 показана схема включения устройства инжекции тока во вторичную силовую обмотку ДГР.

Для более точного вычисления параметров сети с инжекцией тока в нейтраль необходимо использовать более точную схему замещения сети (рис. 5).

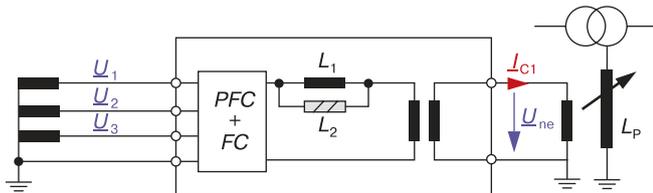
Используя инжекцию частот, не равных 50 Гц, и схему замещения по рис. 5, можно достаточно точно определить следующие параметры сети:

- емкость сети на землю B_C ;
- индуктивность ДГР на других подстанциях, включенных в сети, $B_{\text{Fix}2}$;
- индуктивность ДГР, включенных параллельно реактору с инжекцией тока, $B_{\text{Fix}1}$;
- сопротивление нулевой последовательности трансформатора вывода нейтрали Z_{OTR} , к которому подключен реактор с инжекцией тока;

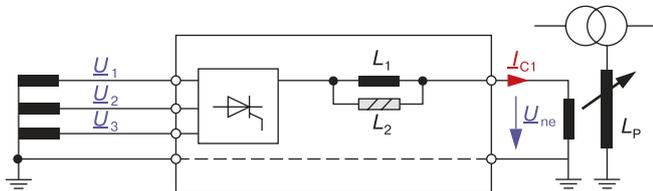
■ Рис. 6. Оценка параметров каждого фидера



■ Рис. 7. Устройство инъекции тока на основе преобразователя частоты (FC) с коррекцией коэффициента мощности (PFC)



■ Рис. 8. Устройство инъекции тока на основе тиристоров, создающее 3 частоты



- текущую расстройку тока компенсации;
- активное сопротивление шунтирующих резисторов в сети.

ПОИСК ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ

Концепция оценки параметров сети с помощью инъекции двух частот может быть применена к каждому отдельному фидеру сети. Тогда инжектируемый ток измеряется на каждом присоединении с помощью трансформатора тока нулевой последовательности (рис. 6).

Поскольку помехи по 50 Гц не влияют на измерения, выполняемые на других частотах, измеренное напряжение $U_{0Δ}$ (напряжение нулевой последовательности на шинах подстанции) можно использовать для оценки параметров каждого фидера.

Такой алгоритм был назван DIF-алгоритмом (Detection by Injecting Frequencies) поиска однофазных замыканий.

С помощью инъекции двух частот можно определить емкость фидера B_{Ck} , активное сопротивление изоляции Y_{Wk} и индуктивность ДГР B_{Lk} на этом фидере (если они установлены). Используя дополнительно 50 Гц напряжение естественной несимметрии на нейтрали, можно определить естественный небаланс параметров сети. На основе измеренных значений и предыдущего измерения можно выявить возникновение однофазного замыкания на фидере, в том числе и через значительное переходное сопротивление.

Преимущество рассмотренного алгоритма поиска однофазных замыканий заключается в том, что все измерения выполняются одновременно. Проблема слежения за коммутациями в сети снимается.

ТИПЫ УСТРОЙСТВ ИНJEКЦИИ ТОКА

Тип первый

Наиболее простой вариант реализации устройства инъекции тока – это использование стандартного преобразователя частоты в качестве источника тока, как показано на рис. 7.

Для снижения влияния на сеть 400 В используется коррекция коэффициента мощности. Индуктивность L_1 , соответственно параллельная цепь $L_1 // L_2$, используется для превращения пульсирующего напряжения в ток. Величина $L_1 // L_2$ определяет максимальный инжектируемый ток. Вторичная силовая обмотка ДГР обычно выполняется на напряжении 500 В, поэтому для подключения устройства инъекции тока необходимо использовать однофазный трансформатор. При использовании устройства по рис. 7 можно

a-eberle
GLOBAL NET QUALITY



Официальный представитель в России

ЭНЕРГАН ENERGAN

ООО «Энерган» www.energan.ru
Санкт-Петербург, ул. Авиационная, 23
т./ф.: (812) 373-90-30, 373-90-17, info@energan.ru

REG-DPA цифровые регуляторы дугогасящих реакторов 6–35 кВ



Цифровые регуляторы REG-DPA предназначены для автоматического управления плунжерными дугогасящими реакторами 6–35 кВ

ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

- **Удобство эксплуатации** (вычисляет емкостной ток сети, отображает на дисплее резонансную кривую сети, автоматически отслеживает изменения емкости сети).
- **Высокая чувствительность по напряжению $3U_0$** (в диапазоне 0,1–120 В), не требуется установка высоковольтного конденсатора для создания искусственного смещения нейтрали.
- **Функция master-slave** (обеспечение параллельной работы дугогасящих реакторов при объединении секций распределительного устройства 6–35 кВ).
- **Восстановление характеристики измерительного потенциометра** (гарантирует работоспособность дугогасящего реактора при отказе или сбое в работе измерительного потенциометра вследствие его износа).
- **Автоматическое управление шунтирующим резистором** (подключение и отключение резистора на вторичную силовую обмотку дугогасящего реактора для поиска однофазных замыканий на землю).
- **Устройство ввода тока в нейтраль сети** – дополнительная опция (применяется при малых напряжениях $3U_0$ для измерения емкости сети, что обеспечивает точную работу регулятора и малый износ привода реактора).

REG-DA цифровые регуляторы устройств РПН трансформаторов

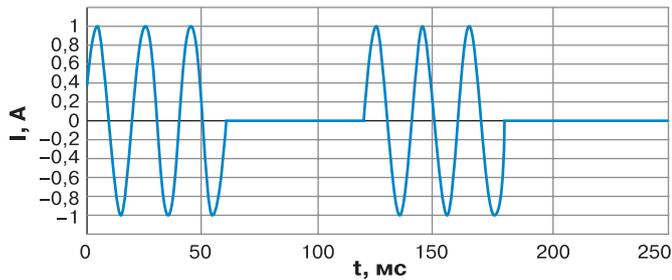


Цифровые регуляторы REG-DA предназначены для автоматического управления устройствами РПН силовых трансформаторов

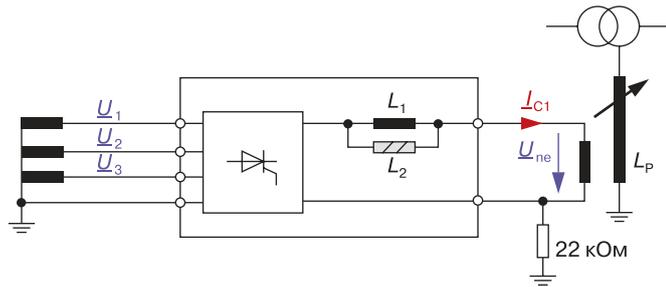
ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ:

- **ЖК-дисплей** (отображение позиции РПН, напряжения и др.).
- **Измерение $U, I, P, Q, S, \cos \phi, \phi, I_{sin} \phi, f$** .
- **Режим самописца, записи событий, статистики** (число переключений РПН, число переключений на отвод).
- **ParaGramer функция**.
- **Функция мониторинга трансформатора** (запись температуры наиболее нагретой точки и определение расхода ресурса службы).
- **Поддержка протоколов включения в SCADA системы** (IEC 61850, IEC 60870-5-101, IEC 60870-5-103, DNP 3.0, Profibus-DP, SPABUS, MODBUS RTU).

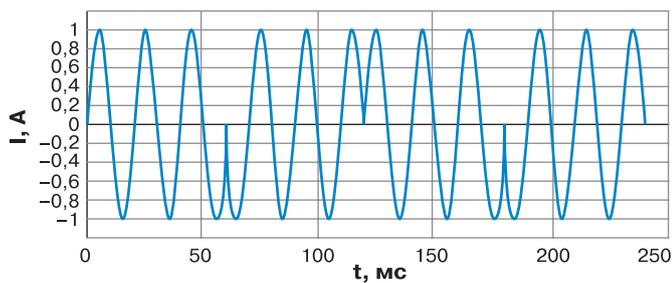
■ Рис. 9. Инжектируемый ток по второму типу



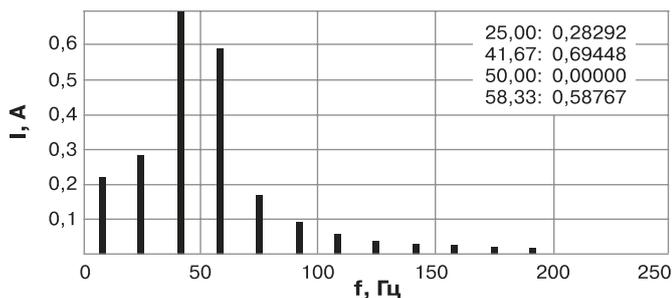
■ Рис. 10. Устройство инjection тока на основе тиристоров, создающее 2 частоты



■ Рис. 11. Инжектируемый ток по третьему типу



■ Рис. 12. Частотный спектр по третьему типу



легко получить два тока инjection с индивидуальной амплитудой, частотой и фазой. Однако реализация такого устройства является достаточно затратным решением.

Тип второй

Если исходить из отсутствия требования к изменению частот инжектируемых токов, то может быть предложено более дешевое решение на тиристорах с инjection трех частот (рис. 8).

На рис. 9 показан образец инжектируемого устройства (рис. 8) тока.

Тип третий

Главный недостаток второго типа устройств заключается в том, что основная частотная составляющая спектра – 50 Гц. Этот недостаток может быть исключен в случае тиристорного преобразователя, где возможно инвертировать направление тока в период предыдущей паузы (рис. 10). На рис. 11 показан образец инжектируемого устройства тока. Соответствующий частотный спектр тока представлен на рис. 12. Как видно, в инжектируемом токе отсутствует составляющая с частотой 50 Гц. Две наиболее значимые частоты спектра инжектируемого тока – это 41,67 и 58,33 Гц. Амплитуды этих составляющих на стороне высокого напряжения составляют 0,69 и 0,59 А. Токи такой величины не вызывают сколько-нибудь серьезных гармонических возмущений в сети и при современном уровне развития цифровой техники позволяют вычислить параметры сети по описанному выше алгоритму. Кроме того, малая величина инжектируемых токов не создает существенного увеличения тока однофазного замыкания в месте повреждения. То есть, если процесс измерения параметров сети совпал с возникновением замыкания на землю, объем разрушения изоляции в месте пробоя из-за инjection тока не увеличится.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предложенный алгоритм инjection двух частот и поиска однофазных замыканий использован для управления дугогасящими реакторами ЗТС в реальной сети 20 кВ итальянской компании ENEL. На его основе была реализована система автоматического управления настройкой двух дугогасящих реакторов и контроля изоляции 40 отходящих от шин подстанции линий. Устройства инjection тока были размещены в шкафах управления приводом дугогасящих реакторов (непосредственно на реакторах). Основанная на алгоритме система успешно выявляла искусственно создаваемые в разных точках сети однофазные замыкания через переходные сопротивления до 20 кОм. Полевые испытания и практическая эксплуатация показали эффективность нового алгоритма для управления дугогасящими реакторами и выявления замыканий через значительное сопротивление в месте повреждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Druml G., Kugi A., Parr V. Дугогасящие реакторы 6–35 кВ. Повышение точности настройки // Новости ЭлектроТехники. – 2007. – № 1(43). – С. 48–51.

ЗАВОД ПРОИЗВОДИТ СЛЕДУЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ:

- КТП-Б (блочные) 6(10)/0,4 кВ до 1600 кВА: двухтрансформаторные, тупиковые, проходные
- КТП 6(10)/0,4 кВ наружной установки на 160, 250, 400, 630 кВА с кабельным, воздушным вводом: тупиковые, проходные, двухтрансформаторные
- РУ 6(10) кВ, состоящие из камер серии КСО-285, -366, -386, с масляными, вакуумными, автогазовыми выключателями
- РУ 6(10) кВ, состоящие из камер серии КСО-304, с вакуумным выключателем ВВ/TEL, с функциями токовой защиты и дистанционного управления
- Панели распределительных щитов ЩО-70 (-1, -2, -3)
- Вводно-распределительные устройства ВРУ-3
- Распределительные шкафы ШР-11, сборки РТЗО-81, РТЗО-88
- Нетиповые НКУ (щиты, шкафы, пульты, ящики) по чертежам заказчика на базе импортных и отечественных комплектующих
- Электромонтажные изделия

Заводское качество изделий
Соответствие всем нормативам
Полная заводская готовность



Климатическое исполнение УХЛ
Повышенная безопасность
Лицензии и сертификаты



ООО «Завод
электромонтажных
изделий №1 «Электрон»»

