

УДК 621.316.722

## РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ УСТРОЙСТВА РПН ТРАНСФОРМАТОРА

Ратомский Е.И., Сивцов Н.А.

Научный руководитель – м.т.н., ст. преп. Гапанюк С.Г.

Системы электропитания обычно работают на нескольких уровнях напряжения. С момента изобретения в конце 19-го века, трансформатор заложил важную основу для развития современных систем электроснабжения на большие расстояния. Сегодня силовые трансформаторы электрической сети по-прежнему являются чрезвычайно важным оборудованием в энергосистеме, и их соответствующие исследования никогда не прекращались.

Одним из важных показателей для измерения качества электроэнергии является стабильность напряжения. Поскольку выработка и потребление электроэнергии не могут быть сбалансированы, нагрузки и токи изменчивы, а колебания напряжения неизбежны, особенно в излучаемых сетях. Чтобы стабилизировать напряжение сети, подключить сеть и регулировать поток нагрузки, необходимо отрегулировать напряжение.

РПН (устройство регулирования напряжения под нагрузкой) представляет собой устройство для регулировки амплитуды фазного напряжения. По сравнению с устройством регулирования напряжения без нагрузки, РПН обладает характеристиками большого диапазона регулирования напряжения и отсутствием отключения во время процесса, что имеет незаменимые преимущества в улучшении качества электроэнергии и обеспечении экономичной работы энергосистемы. В наше время широко используются механические устройства РПН, но есть все еще некоторые неизбежные недостатки, такие как сложные механизмы, электрическая дуга, медленный ответ и т. д. [1]

Улучшение структуры и рабочих характеристик РПН трансформатора, адаптация его к новым требованиям, развития электросетей, использование быстроразвивающейся технологии силовой электроники для создания устройства РПН распределительного трансформатора и повышения производительности механических устройств РПН неизбежная тенденция в будущем. Рассмотрим несколько технологических маршрутов РПН и проанализируем тенденции и перспективы развития.

### **Основной принцип регулирования напряжения**

Как важные показатели мощности диапазон и размер колебаний напряжения непосредственно влияют на производительность, эффективность и срок службы электрооборудования. Электрооборудование спроектировано и изготовлено в соответствии с номинальным напряжением, при котором достигается оптимизация. Избыточное смещение напряжения не только негативно для нормальной работы пользователя, но также не способствует безопасному и экономичному функционированию энергосистемы. Слишком низкое напряжение увеличит потери в сети и может даже повредить стабильную работу системы. Если напряжение слишком высокое, то это

повредит уровень изоляции электрооборудования и увеличит потери на корону, возникающие в высоковольтной сети. Напряжения в электрической сети соответствуют предписанным стандартам, и для регулировки напряжения необходимы стратегии регулирования напряжения. [2].

Принцип регулировки напряжения показан на рисунке 1. Электрическая энергия, вырабатываемая генератором G, отправляется пользователю через повышение напряжения, линию передачи и понижение напряжения. Предположим, что пропускная способность линии передачи, потери в сети и мощность возбуждения трансформатора игнорируются. Параметры трансформатора были уменьшены до стороны высокого напряжения. Общее сопротивление трансформатора и линии для людей. Общее реактивное сопротивление X. Напряжение на доступном узле нагрузки:

$$U_b = \frac{U_G n_1 - DU}{n_2} = \frac{U_G n_1 - (PR + QX)}{n_2} \quad (1)$$

Формула (1) показывает, что для изменения напряжения узла нагрузки можно изменить напряжение на клеммах генератора, параметры R и X линии, активную P и реактивную мощность Q линии, коэффициент увеличения  $1n$  и коэффициент понижения  $2n$ .

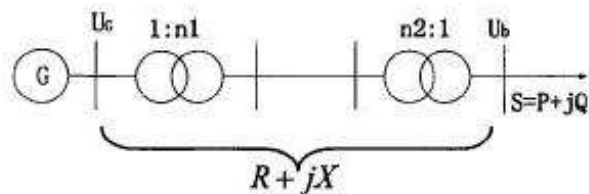


Рисунок 1. Схема регулировки напряжения.

Регулирование напряжения трансформатора существенно меняет отношение  $n$ , которое делится на бесступенчатое регулирование напряжения и ступенчатое регулирование напряжения. Первое обычно используется в местах с низким уровнем напряжения и небольшой емкостью. Ступенчатое регулирование напряжения осуществляется путем изменения количества обмоток трансформатора. Меняется число витков, а затем меняется соотношение, чтобы стабилизировать выходное напряжение вторичной обмотки. Ступенчатое регулирование напряжения трансформатора включает в себя: ПБВ (переключение без возбуждения) и РПН. Первый заключается в изменении коэффициента напряжения трансформатора в случае сбоя питания (первичная сторона отключена от сети), а затем регулировка напряжения вторичной обмотки. Пошаговое регулирование напряжения под нагрузкой означает, что трансформатор оснащен отводом на определенной обмотке и отводом изменение завершается, когда вторичная сторона подключена к нагрузке. Когда изменение ответвления выполнено, часть обмотки снимается или подключается для изменения количества витков обмотки. Соотношение

также изменилось, в конечном итоге изменив выходное напряжение и достигнув регулирования напряжения.

### **Устройство РПН в энергосистеме**

Подстанции энергосистемы часто оснащены устройством РПН для передачи высокого напряжения и распределения важных нагрузок. Трансформатор, оснащенный устройством РПН, может изменять число витков катушки посредством переключения, когда есть нагрузка, тем самым изменяя их соотношение, чтобы регулировать напряжение узла и улучшать качество мощности; и может регулировать поток нагрузки энергосистемы, снижать стоимость устройства реактивной мощности и экономить электроэнергию. В электросети с реактивным источником питания регулирование напряжения под нагрузкой является удобным, эффективным и экономичным методом контроля качества напряжения. Устройство РПН имеет большой диапазон регулировки, не сложное в эксплуатации и не требует больших инвестиций. Кроме того, это также может уменьшить энергосистему благодаря циркуляции, предотвращению непреднамеренного обмена реактивной мощностью, снижению потерь в параллельных рабочих линиях, повышению надежности электроснабжения и более гибкому планированию энергосистемы. Комбинация реактора, конденсатора и устройства РПН также может образовывать гибкие и надежные компоненты передачи.

### **Технология механического регулирования напряжения под нагрузкой**

Классическое устройство РПН имеет два независимых селекторных переключателя и переключателя. Реактивное устройство РПН с переходным реактором в качестве устройства ограничения тока должно отключать ток, что не только увеличивает объем, но и увеличивает количество трансформаторного масла. С появлением вакуумных выключателей при перестановке обмоток реактивного сопротивления вакуумный выключатель появился на реактивном устройстве РПН [3].

Вакуумный выключатель может подавлять образование дуги. Вакуумная среда подходит для переключения больших токов, а контакты в основном не требуют технического обслуживания. Однако из-за некоторых ограничений работы вакуумного выключателя это решение не нашло широкого применения в инженерной практике.

### **Сравнение активного и реактивного устройства РПН**

Резистивное устройство РПН обычно принимает структуру скрытого типа, переключения трансформаторного масла и перехода сопротивления. Срок службы дугового контакта переключателя намного больше, чем у реактивного типа. Из-за малого времени перехода пружинный механизм обычно приводится в действие механизмом с приводом от двигателя, чтобы сделать переключение более надежным и быстрым. Характеристика реактивного устройства РПН - простая структура, и число шагов регулирования напряжения удваивается, когда число отводов является постоянным. И даже если блок питания моторного привода механизма выходит из строя в определенной позиции при переключении, это не влияет на нормальную работу устройства. Недостатком является то, что коэффициент мощности циркулирующего тока низкий, фаза

задерживается на 90 градусов, а электрический срок службы контактов переключателя относительно короткий. Трансформатор с переключателем реактивного сопротивления большой и дорогой, и теперь только США все еще используют его. Сходство между ними заключается в том, что отвод выбора всегда выполняется в условиях холостого хода, передача нагрузки выполняется специальным контактом или переключателем, а ограничивающий ток элемент работает только во время процесса переключения. Разница в том, что реактор не вырабатывает много тепла и предельное значение тока можно переключать медленно. Время переключения от 5 до 6 с. Элемент активного сопротивления потребляет большое количество энергии и перегревается. Это должно быть переключено быстро. Время переключения составляет около 40 мс. В противном случае текущее время переноса резистора будет слишком большим, повышение температуры будет слишком ограниченным, а потери будут слишком большими. Следовательно, устройство переключения сопротивления должно иметь механизм быстрого действия. Ток переключения реактивного переключателя задерживается на 90 градусов, характеристики тушения дуги плохие, срок службы контактов короткий, загрязнение трансформаторного масла более серьезное, а работы по техобслуживанию громоздки. Активный ток переключения такой же, как у фазы восстановительного напряжения, коэффициент мощности циркулирующего тока равен 1, резистивная дуга легче подавляется, срок службы контакта большой, а работы по техническому обслуживанию и ремонту просты. Поэтому резистивный тип больше подходит для случаев с более высоким напряжением и большей емкостью. С точки зрения производственного процесса, переходное реактивное сопротивление рассчитывается в соответствии с постоянной номинальной нагрузкой, которая потребляет больше материалов, занимает больше объема и является более дорогой. Переходной резистор рассчитан на кратковременную нагрузку, мал по размеру и низкой стоимости. Структура резистивного устройства РПН более сложна, но компактна. Если уровень процесса высокий, резистивный тип сохранит материал.

### **Новая технология регулирования напряжения под нагрузкой**

Ввиду недостатков и проблем традиционного механического устройства РПН, ученые провели много исследований и предложили множество новых регуляторов напряжения под нагрузкой. По характеристикам отводов этих устройств их можно в основном разделить на два типа: механический улучшенный тип и силовой электронный тип переключателя. Механически усовершенствованное устройство РПН относится к устройству РПН, изготовленному из механического переключателя с силовым электронным переключателем. Смысл состоит в том, чтобы использовать силовое электронное устройство в качестве переходного устройства при переключении отвода, используя силовой электронный переключатель в качестве цепи включения и выключения, и механический контакт не отключается, тем самым подавляя дугу.

В 1990 г. в Великобритании предложили стабилизатор напряжения под нагрузкой с использованием тиристорного шунта. В устройстве используются

отдельный переходный резистор и тиристор для подавления дуги, возникающей в процессе переключения. Простое расположение контактов механического переключателя гарантирует, что тиристор, используемый для подавления дуги, подключается к цепи только в течение короткого периода времени и что выход из строя тиристора не приводит к повреждению селектора отводов или трансформатора [4]. Когда переключатель активирован, импульсный трансформатор подает триггерный сигнал на оба набора тиристоров независимо от текущего направления действия. Всегда будет ряд условий, так что ток нагрузки будет проходить через тиристор, чтобы завершить гашение дуги. Преимущество состоит в том, что в процессе переключения нет дуги, срок службы переключателя значительно увеличивается, и, таким образом, количество переключений может быть увеличено; недостаток состоит в том, что триггер тиристора реализуется импульсным трансформатором, и относительно сложно спроектировать и изготовить трансформатор, и принята схема РПН для коммутатора.

Механическое улучшенное устройство РПН имеет следующие характеристики: введение тиристорного переключателя в схему переключения позволяет механическому переключателю работать без питания или эквипотенциала, тем самым достигая переключения без дуги, и после переключения завершено, тиристор снят, все еще с помощью механического переключателя проводит ток нагрузки; Скорость переключения в основном определяется временем работы механического переключателя.

Следовательно, механически модифицированное устройство РПН может решить проблему искрения во время переключения, но структура все еще сложна, цикл действия длинный, а скорость отклика относительно низкая [5], и напряжение не может быть быстро отрегулировано.

### **Силовой электронный переключатель устройства РПН**

С 1990-х годов ученые начали изучать устройство РПН типа силового электронного переключателя, которое улучшило скорость реакции регулирования напряжения при регулировании напряжения под нагрузкой. Были изучены топологии и типы силовой электроники. Ученые в 2010 году предложили новый тип твердотельного устройства РПН на основе силового электронного переключателя. Схема использует тиристор в качестве переключающего устройства и использует микроконтроллер AVR для управления им методом дискретной модуляции. Рисунок 2 - принципиальная схема бесконтактного РПН с управляемой схемой переключения. В схеме I K1-K6, K0 представляют собой тиристорные переключатели, QF - это механический переключатель, а R0 и R - переходные резисторы, которые используются для предотвращения повреждения трубки переключателя, вызванного импульсным током возбуждения, и для балансировки напряжения, Преимущество этой схемы состоит в том, что можно реализовать переключение без дуги, потери на переключение малы, скорость переключения высока, и переключение может выполняться часто. Недостатком является то, что тиристор также используется для передачи тока нагрузки в нормальных условиях, а надежность работы низкая. Каждая из ветвей K22-K0 и K21 несет

частичный ток, ток на тиристор уменьшается, что делает схему более надежной, но требует вдвое больше тиристорov.

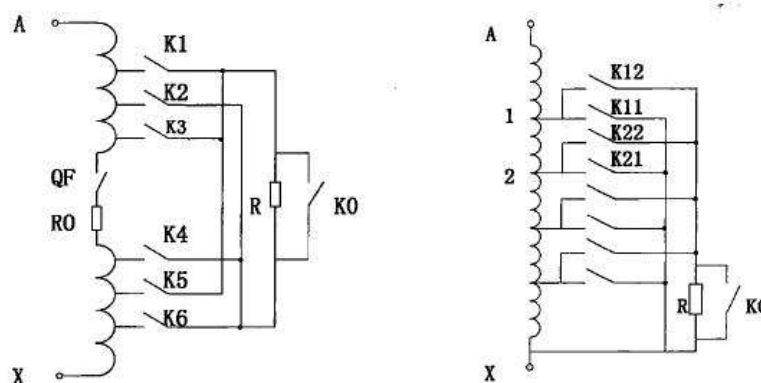


Рисунок 2. Принципиальная схема силового электронного переключателя I (слева) и II (справа).

### Сравнение характеристик в разных устройствах РПН.

В настоящее время большинство устройств РПН по-прежнему использует тип механического контакта, который имеет следующие недостатки: искрение легко происходит во время переключения, действие и скорость отклика медленные, время действия переключения не может быть точно отрегулировано, частота отказов высока, а объем технического обслуживания велик. Процесс переходного процесса во время передачи может быть вредным для безопасной работы сети. Быстрое развитие дисциплин в области силовой электроники привело исследователей к совершенствованию дугогасящей среды и приступило к изучению структуры переключателей и принципа перехода.

Новое устройство РПН, основанный на технологии силовой электроники, стало отечественным и зарубежным благодаря своей долговечности, экономичности и частой настройке. Полностью электронное устройство РПН обычно соединяет обмоточный отвод и силовой электронный переключатель, состоящий из мощного антипараллельного тиристора, и осуществляет регулирование напряжения путем управления включением-выключением трубки переключателя. Оно не имеет механических движущихся частей, не генерирует дугу при переключении и имеет высокую скорость отклика. Обладает большей управляемостью, но количество тиристорov выросло. В нормальных условиях оно должно выдерживать напряжение и проводить ток. При выборе типа необходимо оставить больше запаса, увеличить стоимость, снизить надежность, а также необходимо установить охлаждающее устройство. И есть также ахиллесова пята: как только тиристор поврежден, выключатель полностью выходит из строя. Механически улучшенное устройство РПН не сильно изменилось по структуре. Когда переключатель включен, тиристор вводится для предотвращения образования дуги. После переключения механический переключатель все еще отвечает за поток, и в основном может быть реализована работа без дуг, что в определенной степени повышает надежность и срок службы. Тем не менее, скорость отклика значительно не улучшилась. В настоящее время многие люди все еще стремятся изучить

гибридное решение для устройства РПН, чтобы добиться надежности, обеспечиваемой полностью электронным решением, и избежать проблемы тепловыделения управляемого устройства. Характеристики нескольких различных типов коммутации устройств РПН, представленных выше, сравниваются в таблице 1 ниже.

Таблица 1 – Характеристики типов коммутации устройств РПН

Тип	Скорость	Электрическая дуга	Потери коммутатора	Влияние отказа тиристора	Выявление неисправности системы	Стоимость
Традиционный механический	Низкая	Большая	Да	Нет	Нет	Высокая
Улучшенный механический	Низкая	Маленькая	Да	Нет	Нет	Высокая
Силовой электронный	Высокая	Отсутствует	Да	Да	Да	Может быть уменьшена

### Заключение.

В этом документе рассмотрена существующая схема управления напряжением устройством РПН, а также новые методы управления напряжением. Хотя традиционное механическое устройство РПН широко используется для регулирования напряжения в электросети, его длительное время горения дуги и большая стоимость ограничивают его дальнейшее развитие. С развитием технологии силовой электроники, ценовые преимущества электронного устройства РПН и хорошие характеристики не имеют аналогов среди других типов. В настоящее время основная проблема электронного устройства РПН состоит в том, что надежность нуждается в дальнейшем улучшении, а алгоритм требует дальнейшей оптимизации и улучшения.

### Литература

1. Chung Y.H. Dynamic voltage regulator with solid state switched tap changer / G.H. Kwon, T.B. Park // IEEE PES International Symposium on Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. – 2003. – pp. 05 – 108.
2. Fohrhaltz H.A. Load tap-changing with vacuum interrupters // J. IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 1967. – pp. 422 – 428.
3. Hochart B. Power transformer handbook // Butterworth E. Co. (Publishers) Ltd., Saint-Quen. – 1987. – Chapter 2.
4. Cooke G.H. Thyristor assisted on-load tap changers for transformers // IEE Conference Publication. – 1990. – pp. 127 – 131.
5. Degeneff R.C. A new concept for a solid-state on-load tap changer // J. 1:7 – 1990. – pp. 1-4.