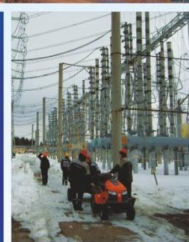
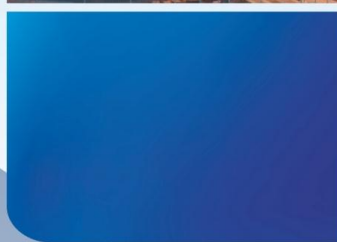


QU-ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА ОСНОВАНИИ ИЗМЕРЕНИЙ



И.М. Абраменко, А.А. Небера, Н.Г. Шубин

Контекст



С ростом количества активных устройств (**АКТУС** - ГЕН, ИРМ, ИНВ, ИБП, УП) растет потенциал \uparrow КЭЭ по U и \downarrow Δ Э (10%) в сетях СН и НН



Множество **АКТУС** с независимыми автоматическими регуляторами (**АР**) в сети могут создать проблемы неустойчивости регулирования: низкочастотные колебания U и \pm обменные потоки Q, что приведет к неприемлемым условиям для потребителей, отключениям, неоптимальным эл. режимам с \uparrow Δ Э



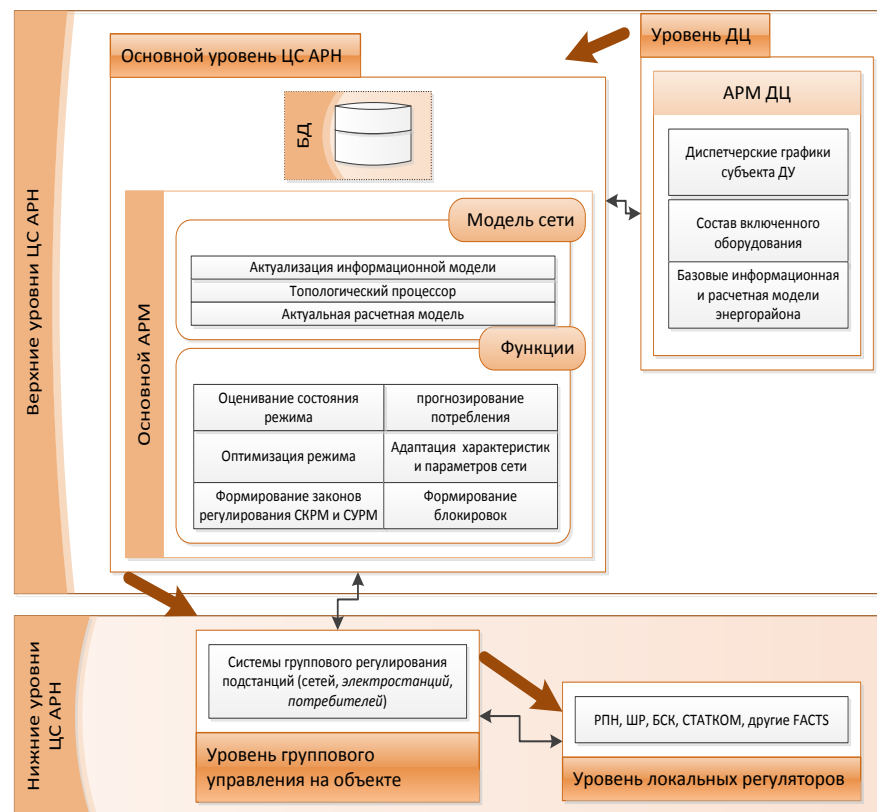
Для реализации потенциала необходима координирующая АС оптимального управления эл. режимом по Q и U (**QU-оптимизация**)

Возможный подход

Построение АС не вызывает затруднений – достаточно организовать циклический запуск классического ПО QU-оптимизации на регулярно актуализируемой математической модели электрической сети с последующей рассылкой вновь рассчитанных законов управления на АКТУС

Однако, вторжение управляющих систем в режим U сетей НН существенно влияет на узловые нагрузки – и количественное выражение этого влияния нам, как правило, не известно

Некорректный учет СХ Р и Q-нагрузок в связи с отсутствием фактических знаний, а также в связи с изменением параметров СХН в течение суток может приводить к росту потерь в сети вместо желаемого снижения или хуже – приводить к недопустимым режимам



Предлагаемый подход

Предложен **ИНОЙ** подход к решению задачи QU-оптимизации и, возможно, ряда других задач управления режимами электрических сетей

СВОБОДНЫЙ ОТ НАШЕГО НЕЗНАНИЯ РЯДА ФАКТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕТИ, ОБОРУДОВАНИЯ, ПОТРЕБЛЕНИЯ,

основанный исключительно на синхронизированных векторных измерениях (СВИ или PMU-измерения) , при котором

В КАЧЕСТВЕ ОПТИМИЗИРУЕМОЙ МОДЕЛИ ВЫСТУПАЕТ САМА ФИЗИЧЕСКАЯ ЭНЕРГОСИСТЕМА

со всем многообразием своих фактических характеристик

Разработка сделана по мотивам работ Н.С. Маркушевича

Целевая функция

Подход к QU-оптимизации построен на применении синхронизированных измерений векторов напряжений на шинах наблюдаемой электрической сети

Целевая функция оптимизации $\pi(\dot{U}) \rightarrow \min$, где $\pi(\dot{U})$ - ΔP в сети

$$\pi(\dot{U}) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1 \neq i}^n (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \times G_{ij}$$

n – количество узлов в оптимизируемой схеме; i, j - номера узлов; $G_{ij} = \frac{R_{ij}}{Z_{ij}^2}$ – активная проводимость ветвей, ограниченных узлами i и j может быть определена по СВИ; U_i, U_j – модули измеренных векторов напряжений, $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$, δ_i и δ_j – их фазовые углы, \dot{U} – вектор напряжения, характеризующийся модулем (магнитудой) и фазовым углом

Целевая функция может быть и иной: например: **поддержание максимального резерва регулирования Q** или **минимальная стоимость потребляемой энергии** или ...

Условие минимума

Условие минимальности потерь – нулевое значение частных производных потерь мощности по управляемым переменным оптимизации

В представленном случае - это реактивные мощности АКТУС Q_m , но могут быть и комплексные K_T трансформаторов или РОУТЕРОВ

$$\frac{\partial \pi}{\partial Q_m} = \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \begin{pmatrix} U_i \frac{\partial U_i}{\partial Q_m} + U_j \frac{\partial U_j}{\partial Q_m} + U_i U_j \sin \delta_{ij} \frac{\partial \delta_{ij}}{\partial Q_m} \\ -U_i \cos \delta_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial Q_m} - U_j \cos \delta_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial Q_m} \end{pmatrix} \times 2G_{ij} = 0$$

Чувствительности $\frac{\partial U_i}{\partial Q_m}$; $\frac{\partial U_j}{\partial Q_m}$; $\frac{\partial \delta_{ij}}{\partial Q_m}$ и G_{ij} определяются на основании PMU-измерений по фактам реализации управляющих воздействий (УВ) - ΔQ_m и ΔK_{TK} .

Текущие значения производных могут быть выведены на монитор

Определение ОВ

Эффективные градиентные методы оптимизации 1-го порядка хороши при работе с мат.моделями ЭЭС, поскольку с ними можно выполнять любое количество (десятки) итераций для достижения оптимума

Когда роль математической модели исполняет реальная энергосистема, необходимы **МАЛОШАГОВЫЕ** методы, позволяющие достигать оптимального решения за несколько шагов

Для резкого сокращения количества итераций оптимизации предлагается использовать методы второго порядка, оперирующие не только с первыми, но и со вторыми производными целевой функции

Высокая эффективность методов второго порядка при оптимизации электрических режимов связана с квадратичной природой потерь, вытекающей из закона Джоуля-Ленца.

Условие минимума (продолжение)

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial \pi}{\partial Q_1} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_1^2} \times \Delta Q_1 + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_1 \partial Q_2} \times \Delta Q_2 + \dots + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_1 \partial Q_m} \times \Delta Q_m \rightsquigarrow 0 \\ -\frac{\partial \pi}{\partial Q_2} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_2 \partial Q_1} \times \Delta Q_1 + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_2^2} \times \Delta Q_2 + \dots + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_2 \partial Q_m} \times \Delta Q_m \rightsquigarrow 0 \\ \dots \\ -\frac{\partial \pi}{\partial Q_m} = \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_m \partial Q_1} \times \Delta Q_1 + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_m \partial Q_2} \times \Delta Q_2 + \dots + \frac{\partial^2 \pi}{\partial Q_m^2} \times \Delta Q_m \rightsquigarrow 0 \end{array} \right.$$

или в матричной форме:

$$-J_Q^\pi = H_Q^\pi \Delta Q,$$

где: J_Q^π и H_Q^π , соответственно матрицы первых (Якоби) и вторых (Гессе)

производных потерь по Q_m , ΔQ – искомая матрица ОВ, откуда

$$\Delta Q = -(H_Q^\pi)^{-1} J_Q^\pi,$$

Управление реализацией ОВ

Учитывая что ОВ, рассчитываемые в темпе раз в 20 мс могут носить переменчивый и знакопеременный характер, а также то, что QU - оптимальное управление в нормальных условиях не требует сверхвысокого быстродействия, на выходе интеллектуальной АС предлагается использовать интегрирующее звено, сглаживающее и замедляющее темп управления

В то же время, темп определения ОВ может быть достаточно высоким для использования данного подхода во контуре вторичного регулирования напряжения

При переходе к практической реализации подход должен быть дополнен механизмом учета технологических ограничений по токам, потокам мощности и уровням напряжения. Методы учета перечисленных ограничений могут основываться на введении в целевую функцию соответствующих дополнительных функций

Ограничения

Особенностью подхода является то, что при оптимизации не требуется учет балансов электроэнергии и мощности ни в узлах, ни по энергосистеме в целом, поскольку физическая энергосистема всегда соблюдает этот баланс

Требуется исполнение ограничений в форме неравенств:

- по току $(U_i^2 + U_j^2 - 2U_iU_j \cos \delta_{ij})/Z_{ij}^2$
- по напряжению на шинах U_i
- по потокам активной мощности в сечениях ветвей $U_i I_j \cos \varphi_i$

Данные ограничения могут быть введены в **целевую функцию**, которая преобразовывается в **функцию Лагранжа**, безусловный минимум которой соответствует оптимальному решению с учетом ограничений

Спасибо за внимание!