

П. А. КЯЛЯН

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ГРАНИЦ ДИАПАЗОНА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ БЕСКОНТАКТНОЙ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

В статье рассматривается бесконтактная машина переменного тока, двойного питания (БМДП), работающая с переменной скоростью вращения, в которой при скольжении ротора магнитный поток, создаваемый током возбуждения, вращается относительно разомкнутой обмотки статора с синхронной скоростью ($\omega_1 = 1$) (рис. 1). При этом напряжение возбуждения изменяется с частотой N , а ток в роторной обмотке с частотой, равной скольжению s :

$$N = h - s(1 + h); \quad (1)$$

$$s = 1 - \omega_{p1}, \quad (2)$$

где $h = \frac{p_2}{p_1}$ — отношение числа полюсов возбуждателя p_2 и основной машины p_1 ;
 $\omega_{p1} = \frac{\Omega}{\omega_1}$, Ω — электрическая скорость вращения основной машины;

Ω — угловая скорость вращения ротора.

Обмотка возбуждения питается от специального реверсивного статического преобразователя частоты.

БМДП, как и все машины двойного питания, может работать, в зависимости от закона регулирования напряжения возбуждения, в синхронном или асинхронном режиме [1].

При работе в синхронном режиме частота напряжения возбуждения является независимой переменной.

При этом БМДП присущи все свойства синхронной машины [1]. В качестве примера следует отметить бесконтактный синхронный генератор БСГ [2] и бесконтактный машинный преобразователь частоты БМПЧ [3].

При работе в асинхронном режиме частота напряжения возбуждения является зависимой переменной, автоматически изменяющейся в зависимости от скорости вращения ротора $N = F(s) = h - s(1 + h)$.

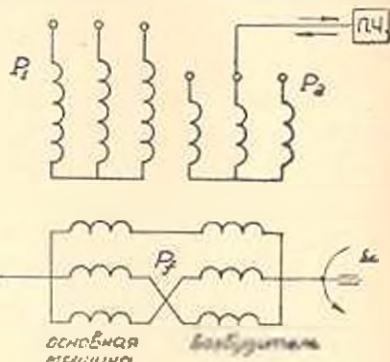


Рис. 1.

Устойчивость работы определяется величиной скольжения. В таком режиме работы БМДП аналогична асинхронизированной синхронной машине и может быть названа бесконтактной асинхронизированной синхронной машиной. Возбудитель БМДП служит для бесконтактной передачи мощности возбуждения от преобразователя частоты на ротор основной машины. Очевидно, установленная мощность системы возбуждения P_B будет равна сумме установленных мощностей возбудителя (ротора) P_f и преобразователя частоты P_2 .

$$P_B = P_f + P_2. \quad (3)$$

Чтобы получить величину установленной мощности, действительно определяющую вес машины, анализ необходимо вести с учетом полной мощности ротора S_f и возбуждения S_2 . Однако, ввиду того, что реактивные мощности статора, ротора и возбуждения БМДП не связаны друг с другом, мы ограничимся лишь соотношениями, полученными из баланса активных мощностей. Кроме того, пренебрегая потерями в обмотках БМДП, можно получить более компактные расчетные формулы.

При изменении скорости вращения ротора активная мощность в роторной обмотке P_f и в обмотке возбуждения P_2 изменяются следующим образом*:

$$P_f = s P_1, \quad (4)$$

$$P_2 = N P_1. \quad (5)$$

Здесь P_1 — активная мощность статорной обмотки;

N — частота напряжения возбуждения.

Следовательно, минимальные значения активной мощности ротора и возбуждения имеют место при различных скоростях ротора БМДП.

Из анализа законов изменения мощностей P_f и P_2 следует найти оптимальное значение границ заданного диапазона изменения скорости вращения ротора ($S_{\min}$ и $S_{\max}$), в интервале между которыми установленная мощность системы возбуждения БМДП P_B — минимальна. Диапазон изменения скорости вращения ротора Δ определится отношением максимальной скорости вращения $\omega_{\max}$ к минимальной $\omega_{\min}$:

$$\Delta = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{1 - S_{\min}}{1 - S_{\max}}. \quad (6)$$

Определив оптимальное значение скольжения в начале заданного диапазона $S_{\min}$ в соответствии с (6) можно найти оптимальное значение скольжения в конце диапазона:

$$S_{\max} = \frac{\Delta - 1 + S_{\min}}{\Delta}. \quad (7)$$

* В выражениях (4) и (5) потери в обмотках БМДП не учитываются.

Мощность в роторной обмотке в начале P_f и в конце P_f заданного диапазона изменения скорости вращения ротора в соответствии с (4) и (7) равна:

$$P_f = s_{\min} P_1, \quad (8)$$

$$P_f = s_{\max} P_1 = \frac{\Delta - 1 + s_{\max}}{\Delta}. \quad (9)$$

Максимальная скорость вращения ротора практически не превышает двойной синхронной скорости и поэтому анализ изменения P_f и P_2 приводится для интервала $-1 \leq s \leq 1$.

Из графиков $P_f = F(s_{\min})$ и $P_f = F(s_{\min})$ (рис. 2), построенных

в соответствии с (8) и (9) видно, что мощность ротора минимальна, если значения P_f и P_f в начале и в конце заданного диапазона Δ равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. Это условие с учетом (8) и (9) запишется следующим образом:

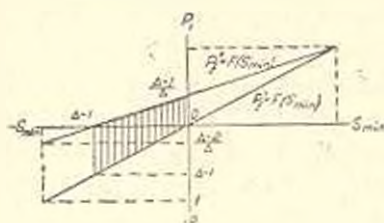


Рис. 2.

$$-s_{\min} P_1 = \frac{\Delta - 1 + s_{\max}}{\Delta} P_1, \quad (10)$$

Решение (10) относительно $s_{\min}$ дает оптимальную величину начала заданного диапазона изменения скорости вращения ротора, при которой установленная мощность ротора P_f минимальна:

$$s_{\min} = -\frac{\Delta - 1}{\Delta + 1}. \quad (11)$$

Скольжение в конце диапазона получается из подстановки (11) в (7):

$$s_{\max} = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1}. \quad (12)$$

Как следует из (11) и (12) оптимальные границы диапазона изменения скорости вращения ротора симметричны относительно синхронной скорости $s=0$. В этом случае мощность ротора в соответствии с (8) и (9) примет следующие значения:

$$-\frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1 < P_f < \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1. \quad (13)$$

Установленная мощность возбудителя P_f равна наибольшему значению мощности роторной обмотки:

$$P_f = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1. \quad (14)$$

Однако, как видно из (13), мощность роторной обмотки меняет свой знак, а следовательно и направление, достигая минимального значения $P_f=0$ (4) при $s=0$, когда в роторной обмотке должен про-

текать постоянный ток. Очевидно в таком интервале изменения скоростей БМДП работать не может. При синхронной скорости и обмотках роторов не наводится э.д.с., так как они вращаются со скоростью магнитных полей основной машины и возбuditеля. Из (8) и (9) следует, что если начало диапазона расположено в интервале $0 > s_{\min} > -(\Delta - 1)$, то мощность ротора в начале диапазона отрицательна $0 > P_1 > -(\Delta - 1) P_2$, в конце — положительна $0 < P_1 < \frac{\Delta - 1}{\Delta} P_2$. При изменении знака мощность роторной обмотки проходит через нулевое значение, при котором БМДП не может работать. Очевидно, чтобы БМДП работала во всем заданном диапазоне изменения скоростей, начало диапазона необходимо выбрать вне интервала $0 > s_{\min} > -(\Delta - 1)$. Выбирая начало диапазона в интервале $1 < s_{\min} < -(\Delta - 1)$ ввиду завышенной величины скольжения, мощность ротора будет также завышена. Следовательно, для работы БМДП с минимальной мощностью ротора, начало диапазона необходимо выбрать в интервале $0 < s_{\min} < 1$. В этом случае из (8) и (9) следует, что мощность ротора в начале диапазона всегда меньше, чем в конце ($P_1 < P_2$). Поэтому, установленная мощность возбuditеля будет равна мощности ротора в конце диапазона, т. е. $P_1 = P_2$. Если начало заданного диапазона расположено в интервале $0 < s_{\min} < 1$, установленная мощность ротора принимает следующие значения:

$$\frac{\Delta - 1}{\Delta} P_2 < P_1 < P_2 \quad (15)$$

Из (9) следует, что минимального значения установленная мощность возбuditеля достигает при

$$P_1 = \frac{\Delta - 1}{\Delta} P_2 \quad (16)$$

Из сравнения (14) и (16) можно отметить, что так как БМДП не может работать с синхронной скоростью вращения ротора, установленная мощность возбuditеля повышается.

В соответствии с (1), (4) и (6) можно записать мощность возбуждения БМДП в начале и в конце заданного диапазона изменения скорости вращения ротора в следующем виде:

$$P_2 = [h - s_{\min} (1 + h)] P_1 \quad (17)$$

$$P_2 = \frac{(1 + h)(1 - s_{\min}) - \Delta}{\Delta} P_1 \quad (18)$$

Из графиков $P_2 = F(s_{\min})$ и $P_2 = F(s_{\min})$ (рис. 3), построенных в соответствии с (17) и (18), видно, что мощность возбуждения минимальна, если ее значения в начале и в конце заданного диапазона равны по абсолютной величине и противоположны по знаку. Полученное условие с учетом (17) и (18) запишется следующим образом:

$$[h - s_{\min} (1 + h)] P_1 = - \frac{(1 + h)(1 - s_{\min}) - \Delta}{\Delta} P_1 \quad (19)$$

Решение (19) относительно $s_{\min}$ дает оптимальную величину начала заданного диапазона изменения скорости вращения ротора, при котором установленная мощность возбуждения P_2 минимальна:

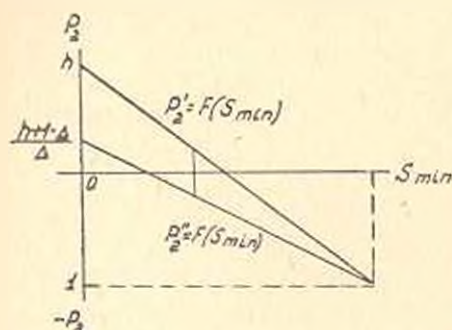


Рис. 3.

$$s_{\min} = \frac{h(\Delta + 1) - (\Delta - 1)}{(1 + h)(\Delta + 1)}. \quad (20)$$

Скольжение в конце диапазона получается из подстановки (20) в (7):

$$s_{\max} = \frac{h(\Delta + 1) + (\Delta - 1)}{(1 + h)(\Delta + 1)}. \quad (21)$$

При изменении скорости вращения ротора в интервале $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ мощность возбуждения в соответствии с (17) и (18) принимает следующие значения:

$$\frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1 \geq P_2 \geq -\frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1. \quad (22)$$

Установленная мощность преобразователя частоты P_2 определяется наибольшим значением мощности обмотки возбуждения и с учетом (22) равна:

$$P_2 = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1. \quad (23)$$

Минимальное значение мощности возбуждения $P_2 = 0$ имеет место при $N = 0$, когда в обмотке возбуждения течет постоянный ток. Скорость вращения ротора при этом в соответствии с (1), (17) или (18) определяется скольжением

$$s = \frac{h}{1 + h}. \quad (24)$$

Однако, размещение границ заданного диапазона $s_{\min}$ (20) и $s_{\max}$ (21), в интервале между которыми установленная мощность возбуждения минимальна, при заданных Δ и P_1 зависит также от величины h .

Для БМДП целесообразно иметь такое значение h , при котором начало заданного диапазона соответствует синхронной скорости, т. е. $s_{\min} = 0$. Как следует из (9) это позволит уменьшить установленную мощность ротора, а следовательно возбuditеля и всей системы возбуждения.

Принимая в (20) $s_{\min} = 0$, находим оптимальное значение h (рис. 4):

$$h = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1}. \quad (25)$$

В этом случае $s_{\min} \neq 0$ и установленная мощность возбудителя определяется не из (14), а в силу (9) и (25) по формуле:

$$P_1 = \frac{h(\Delta + 1) + (\Delta - 1)}{(1 + h)(\Delta + 1)} P_1 \quad (26)$$

Выражение для минимального значения установленной мощности системы возбуждения в соответствии с (3), (23) и (26) запишется в следующем виде:

$$P_B = 2 \frac{\Delta(1 + h) - 1}{(1 + h)(\Delta + 1)} P_1 \quad (27)$$

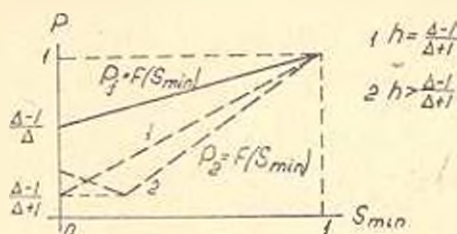


Рис. 4.

Возможна и обратная задача. Имеется БДМП, для которой известны величины h , P_1 и P_B . Необходимо определить максимальный диапазон скоростей Δ и его границы $s_{\min}$ и $s_{\max}$. Для решения такой задачи используется выражение (27), из которого задавшись значениями h , P_1 и P_B можно найти величину Δ и подставляя ее в (20) и (21) определить $s_{\min}$ и $s_{\max}$.

БДМП, обладая всеми свойствами машины двойного питания, отличается от нее наличием возбудителя, обеспечивающим бесконтактность машины. В результате такого исполнения обмотка возбуждения последней служит роторной обмоткой БДМП. Интересно выяснить, насколько увеличивается из-за наличия возбудителя установленная мощность системы возбуждения БДМП по сравнению с МДП, если диапазоны изменения скоростей вращения роторов Δ у них равны. Роторная обмотка МДП, являясь обмоткой возбуждения, питается через контактные кольца непосредственно от преобразователя частоты. Это позволяет при изменении скорости вращения ротора, работать также при синхронной скорости $s = 0$, при которой в обмотке возбуждения МДП протекает постоянный ток. Установленная мощность возбуждения МДП, равная мощности роторной обмотки, найдется в соответствии с (14)

$$P_1 = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1 \quad (28)$$

Установленная мощность возбуждения БДМП находится в соответствии с (23)

$$P_2 = \frac{\Delta - 1}{\Delta + 1} P_1 \quad (29)$$

Из (28) и (29) следует, что если диапазоны изменения скоростей вращения МДП и БДМП равны, то установленные мощности возбуждения также равны. Следовательно, установленные мощности систем возбуждения этих машин должны отличаться на величину установленной мощности возбудителя БДМП. Разность выражений (27) и (28) показывает установленная мощность системы возбуждения БДМП больше, чем в МДП.

$$\Delta P_B = \frac{h(\Delta + 1) - (\Delta - 1)}{(1 + h)(\Delta + 1)} P_1. \quad (30)$$

Полученное выражение (30) не отличается от выражения установленной мощности возбудителя (26). Выражение (26) или (30) с учетом (9) и (21) может быть записано в более удобном виде:

$$\Delta P_B = P_f = \frac{\Delta - 1 + s_{\min}}{\Delta} P_1. \quad (31)$$

Итак, разность установленных мощностей систем возбуждения БМДП и МДП равна установленной мощности возбудителя.

В качестве примера определим оптимальные границы $s_{\min}$ и $s_{\max}$ изменения скорости вращения ротора БМДП, у которого $n_n = 6000$ об/мин для диапазона $\Delta = 2,5$.

В соответствии с (25) находится оптимальное значение $h = 0,43$.

Полученное значение округляется до большего реального $h = 0,5$, при котором возможны следующие значения: τ_1 и τ_2 ; 2 и 4; 4 и 8 и т. д. (для $n_n = 6000$ об/мин выбирается: $\tau_1 = 8$ и $\tau_2 = 4$).

В соответствии с (20) и (21) находятся $s_{\min} = 0,01$ и $s_{\max} = 0,62$.

Установленная мощность системы возбуждения БМДП находится в соответствии (27) (в предположении, что $P_1 = 1$) $P_B = 1,05$.

Использование машины с контактными кольцами, позволяет мощность системы возбуждения определять по (14) $P = 0,43$.

Разности установленных мощностей системы возбуждения БМДП и МДП определится в соответствии с (31) $\Delta P_B = 0,62$.

Армянский НИИ энергетики

Поступило 14.IX 1965

Պ. Ա. ԿԵԼՅԱՆ

ԱՄԵՐԱՆԻ ԿՈՆՏԱԿՏԻ ՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ՍԵՔՆԱՆՆԵՐ ՊԵՏԱԿԱՆ ԱՐԴԱՐՈՒԹՅԱՆ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ԿՈՒՊԱՋՈՆԻ ՕՊՏԻՄԱԼ ԱՆՇՄԱՆՆԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՐԵ

Ա Մ Փ Ո Փ Ա Ն

Հաստիկ սարքավորումներում, որոնք պահանջում են սխեմիկ բարձր հուսալիություն, ցանկալի է ունենալ առանց կոնտակտի մեքենաներ: Գործնականում կիրառվող փոփոխական հոսանքի կրկնակի սնուցմով առանց կոնտակտի մեքենաները (БМДП) նախատեսվում են այնպիսի ուղիստաներների համար, երբ լիսեռի պատման արագությունը հաստատուն է: Այդ դեպքում, կամ զրգրման փափուկի ունենում է հաստատուն հոսանք (առանց կոնտակտի սինխրոն ղեկնորատոր), կամ հաստատուն հաճախականությունով փոփոխական հոսանք (առանց կոնտակտի մեքենայական հաճախականության փոխակերպիչ):

Հոգովածում ղեկոված է փոփոխվող պատման արագությունով աշխատող БМДП, որում ուտորի սահիքի ժամանակ զրգրման հոսանքով ստեղծված մագնիսական հոսքը պատվում է սինխրոն ստատորի բաց փափուկի նկատմամբ: Գրգուման փափուկի սնվում է հաստիկ ղեկիտիվ-ստատիկ հաճախականության փոխակերպիչից: Ուտորի և զրգրման հզորությունների առարքեր օրենքներով

փոփոխվելու հետևանքով, այդ հզորությունների նվազագույն արժեքները տեղի են ունենում ռոտորի պտտման արագությունների տարրեր արժեքների դեպքում:

Ուղղորդորդեն հնարավոր չէ համասեղել այդ հզորությունների նվազագույն արժեքները, որի հետևանքով տվյալ արագության համար անհրաժեշտ ռոտորի և գրգռման ահտիվ հզորությունների դումարը ավելի մեծ է, քան նրանց նվազագույն արժեքների գումարը: Ռոտորի և գրգռման հզորությունների փոփոխման օրենքների վերլուծությունից հաշտնարելոված են՝ տրված դիապազոնում, ռոտորի պտտման արագության փոփոխման սահմանների ուստիմալ արժեքները, որոնց միջև ВМДП-ի զրգոման սիստեմի զրվածքալին հզորությունը նվազագույն է:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Botvinik T. T., Shukarjan J. G. and Bloekt M. A. Basis theory of asinchronized synchronous machines *Ayomatika Zagreb-Yugoslavia*, VI (1965), 1.
2. Красношапка М. М. О проектировании авиационных бесконтактных генераторов переменного тока и выбора параметров системы стабилизации частоты. Тр. РК ВИАВУ, вып. 59, 1958.
3. Бамдас А. М., Нерсисян В. С. Одномашинный бесконтактный преобразователь частоты. Тр. ГИИ им. Жданова, вып. 3, 19, 1963.