O TELECOMANDO CENTRALIZADO A FREQUÊNCIA MUSICAL E AS FREQUÊNCIAS HARMÓNICAS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

JOSÉ CATELA ROLLA

Engenheiro Electrotécnico (U. P.)

EX-ASSISTENTE DA FACULDADE DE ENGENHARIA

I. INTRODUÇÃO

O incremento sempre crescente do consumo da energia eléctrica — estabelecido empìricamente na relação simples e universal da duplicação em cada década — e o consequente desenvolvimento das redes de distribuição e de transporte e das centrais de produção estão na base das razões determinantes do emprego dos telecomandos centralizados a frequência musical.

Para se fazer face a tal aumento, no tocante a instalações e seu melhor aproveitamento, um dos meios que se deparam é o da regularização do diagrama diário de cargas, com atenuação das pontas e a compensação nas horas de consumo reduzido. Isto consegue-se pelo comando a distância — a partir duma subestação distribuidora — da aparelhagem cuja função e índole de trabalho o permitem e, por vezes, até o aconselham: termoacumuladores, caldeiras eléctricas, bombas; numa palavra, aparelhos domésticos ou similares.

Paralelamente muitas outras aplicações surgiram para os telecomandos e não de menor importância: umas, de vantagem principal para o distribuidor e agregado populacional por ele servido — comando de iluminação e contadores de múltipla tarifa, acerto de relógios síncronos, sinalização de alarme a serviço de bombeiros, etc.; outras, de carácter mais geral, como o alerta a serviços da defesa do território, atingem já o nível do interesse nacional.

Para eficiente consecução do objectivo que se lhe atribui, qualquer sistema de telecomando terá que preencher determinadas condições impostas aquando da sua concepção e construção, visando todas, de uma forma ou doutra, a torná-lo invulnerável à influência dos possíveis agentes perturbadores, cuja acção levaria a falsas manobras. Entre estes merecem especial atenção os harmónicos da frequência própria da rede, já porque as suas causas são as mais diversas, algumas vezes de impossível previsão, já porque nem sempre se podem eliminar totalmente os seus efeitos, mas apenas atenuá-los.

II. AS FREQUÊNCIAS HARMÓNICAS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO

1. *Origens de harmónicos* — É sabido que os sistemas trifásicos, equilibrados, de tensões v_1, v_2 e v_3 se apresentam na prática raras vezes como sistemas sinusoidais e geralmente como sistemas periódicos, de período T e pulsação $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

O desenvolvimento em série de Fourier

$$\begin{aligned} v_1 &= \Sigma\, V_n \cos(n\,\omega\,t - \varphi_n) \\ v_2 &= \Sigma\, V_n \cos\left(n\,\omega\,t - \varphi_n - n\,\frac{2\pi}{3}\right) \\ v_3 &= \Sigma\, V_n \cos\left(n\,\omega\,t - \varphi_n - n\,\frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \qquad (1)$$

mostra-nos que o sistema dado é decomponível numa infinidade de sistemas trifásicos sinusoidais equilibrados: o primeiro, de pulsação ω, é o sistema fundamental; os restantes, de pulsações $2\,\omega$, $3\,\omega$, ..., $n\,\omega$, ... são os sistemas harmónicos.

Cada termo fundamental está esfasado de $\frac{2\pi}{3}$ em atraso em relação ao que o precede, dizendo-se que o sistema assim constituído é um sistema directo com ordem de sucessão 1. Do mesmo modo, os harmónicos constituem sistemas directos cuja ordem de sucessão é igual à ordem dos harmónicos. Como num sistema trifásico o número de ordens de

sucessão distintas e possíveis é 3, na passagem do termo fundamental ao de ordem n encontrar-se-ão essas três ordens sucessivamente reproduzidas.

Há, assim, três sistemas a considerar, conforme o termo geral é:

$n = 3\,k$ com $k > 0$ e inteiro – sistema de ordem zero ou homopolar;

$n = 3\,k + 1$ com $k \geq 0$ e inteiro – sistema directo de ordem 1;

$n = 3\,k - 1$ com $k > 0$ e inteiro – sistema inverso de ordem 1.

O espectro de harmónicos duma rede trifásica mostra-nos, entre outras coisas, a ausência de termos de ordem par e a presença — com amplitudes variáveis — dos de ordem ímpar. Sendo a rede equilibrada os harmónicos múltiplos de três apresentam tão fraca amplitude que tudo se passa como se pràticamente não existissem. Espectros obtidos com regimes de carga diferentes revelam que o desenvolvimento de harmónicos está em relação com a carga da rede, sendo maior nos regimes de carga reduzida do que nos de plena carga.

Os geradores de harmónicos são, como se sabe, certas máquinas eléctricas, estáticas ou rotativas, cujo funcionamento conduz à deformação da onda de tensão ou de corrente, havendo, assim, essencialmente, duas espécies de origens a que poderemos chamar — origens de tensões e origens de correntes harmónicas.

As origens de tensões harmónicas — transformadores, máquinas síncronas e assíncronas — estabelecem nos seus bornes e na rede a que estão ligadas tensões harmónicas V_h independentes da impedância harmónica de curto-circuito da rede Z_{cch}. Essas tensões originarão correntes cuja intensidade I_h é dada pela lei de Ohm, em função de Z_{cch} e da impedância interna do gerador Z_h.

As origens de correntes harmónicas — rectificadores de vapor de mercúrio, máquinas de soldadura por arco, lâmpadas de iluminação fluorescente — debitam sobre a rede correntes harmónicas, cuja intensidade I_h é independente da impedância da rede. Estas duas grandezas, pela lei de Ohm, determinarão o valor da tensão harmónica.

Vejamos, na sua generalidade, o comportamento de umas e outras.

A. *Transformadores* — Quando em regime de saturação, os transformadores são origens de tensões harmónicas que poderemos considerar como sistemas equilibrados se a sua constituição for simétrica (banco de três transformadores monofásicos e transformadores trifásicos de fluxos livres) ou sistemas desequilibrados no caso de assimetria (transformadores trifásicos de fluxos forçados).

O regime harmónico do transformador de estrutura simétrica é dado pelo esquema equivalente de um quadripolo activo que inclua a origem de força electromotriz harmónica fictícia E_h, em série com a impedância magnetizante Z_m. Foi o que se fez na fig. 1 em que se representa o esquema em T.

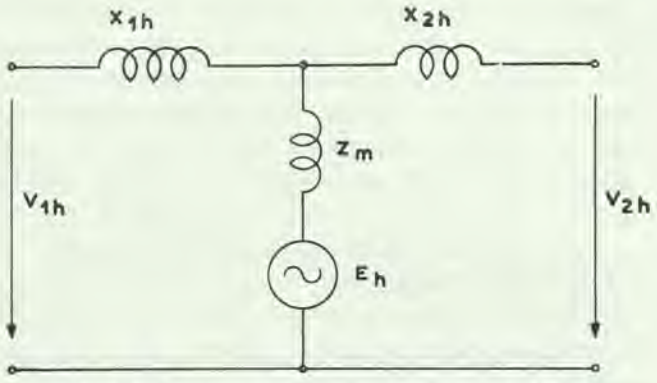

Fig. 1 — Esquema em T do circuito equivalente do transformador

Na consideração dos sistemas harmónicos directos e inversos há a notar que as reactâncias de fugas primária e secundária são funções crescentes da frequência ao passo que a impedância magnetizante só depende do estado de saturação do circuito magnético do transformador, isto é, do valor da tensão à frequência industrial.

Assim, as tensões harmónicas primária e secundária do transformador serão condicionadas pelos valores das suas impedâncias internas e impedâncias harmónicas das redes primária e secundária a ele ligadas, fàcilmente se concluindo que quanto maior a potência maior a deformação que o transformador introduz nas tensões e correntes debitadas.

O regime harmónico homopolar depende da posição do neutro — isolado ou ligado à terra — das ligações internas do transformador — em estrela, triângulo, zigue-zague e, ainda, do número de enrolamentos.

As tensões harmónicas homopolares estabelecem-se entre as fases e o neutro, medindo-se em relação à terra nos enrolamentos em estrela com o neutro a ela ligado e em relação ao neutro quando este se encontra isolado.

As correntes harmónicas múltiplas de 3 circulam livremente nos enrolamentos em triângulo ou em estrela com o neutro à terra.

Na ligação em zigue-zague não há tensões harmónicas múltiplas de três entre fase e neutro, considerando-se, no entanto, estas tensões resultantes de duas outras, iguais e opostas, aplicadas aos semi-enrolamentos de cada fase.

B. *Máquinas síncronas e assíncronas* — Os harmónicos produzidos pelas máquinas síncronas são devidos a qualquer das três causas: distribuição não sinusoidal do campo magnético no entreferro, ondulação periódica do fluxo magnético determinada pelos dentes do rotor e do estator e, finalmente, fenómenos de reacção do induzido.

Comparativamente são as duas últimas as causas mais importantes, pois a primeira é suficientemente atenuada na construção moderna com uma distribuição pràticamente sinusoidal do campo.

A acção dos dentes do estator e rotor leva à produção de harmónicos de frequência f_h dada por

$$f_h = (2\, n_e \pm 1)\, f \qquad (2)$$

em que n_e e f são, respectivamente, o número de ranhuras do estator por polo e a frequência fundamental. São os chamados harmónicos de ranhuras ou de dentes.

A reacção do induzido dá origem aos harmónicos de desequilíbrio sempre que a máquina funciona em regime de cargas desequilibradas. O campo de reacção inverso, isto é, o que se opõe ao movimento do rotor, gera neste harmónicos pares que, por sua vez, originam no estator harmónicos de ordem ímpar. Estas tensões, que constituem sempre sistemas directos, são da mais alta importância bastando, por vezes, pequenos desequilíbrios nas cargas do induzido para daí resultarem elevadas tensões harmónicas.

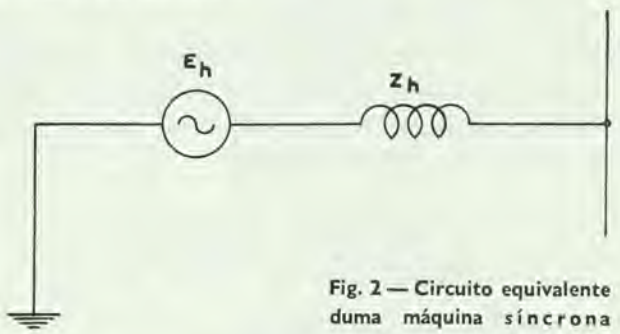

Fig. 2 — Circuito equivalente duma máquina síncrona

O circuito equivalente destas máquinas, fig. 2, pode considerar-se constituído por uma origem de força electromotriz harmónica E_h em série com a impedância interna Z_h.

O valor de Z_h é diferente conforme se trata de sistemas directos e inversos ou de sistemas homopolares.

Sendo h e Z_i a ordem do harmónico considerado e a impedância inversa da máquina à frequência fundamental, tem-se para o valor de Z_h, em primeira aproximação, nos sistemas directo e inverso

$$Z_h = h \,.\, Z_i \qquad (3)$$

No sistema homopolar é

$$Z_{oh} = h \,.\, Z_o \qquad (4)$$

e como Z_o é, geralmente, infinita ou muito grande, Z_{oh} pode considerar-se sempre como infinitamente grande.

Nas máquinas assíncronas são essencialmente duas as causas de harmónicos: a saturação dos circuitos magnéticos, como nos transformadores, e a influência dos dentes e ranhuras, como nas máquinas síncronas.

A primeira causa é pouco importante quando comparada com a segunda, que leva à produção de frequências harmónicas estatóricas f_e e rotóricas f_r dadas por

$$\begin{aligned} f_e &= [2\, n_e\,(1-\sigma) \pm 1]\, f \\ f_r &= [2\, n_r\,(1-\sigma) \pm 1]\, f \end{aligned} \qquad (5)$$

em que n_e , n_r e σ são respectivamente os números de ranhuras do estator e rotor por polo e o deslizamento da máquina.

Abstraindo dos harmónicos de saturação, o esquema equivalente das máquinas assíncronas é análogo ao das máquinas síncronas.

C. *Rectificadores de vapor de mercúrio* — São, como já vimos, origens que debitam sobre a rede correntes harmónicas independentes da impedância de curto-circuito desta.

A amplitude I_h da intensidade de corrente harmónica de ordem h é obtida, em função da amplitude I_1 do termo fundamental e de forma aproximada, pela expressão

$$I_h = \frac{I_1}{h} \qquad (6)$$

Daqui resulta que a tensão nos bornes do rectificador é dada por

$$V_h = Z_{cch}\, I_h = Z_{cch}\, \frac{I_1}{h} \qquad (7)$$

onde Z_{cch} é a impedância harmónica de curto-circuito da rede de alimentação.

Na definição das frequências harmónicas geradas pelos rectificadores é da maior importância a consideração do seu número de fases ou, com mais propriedade — a sua periodicidade, isto é, o número de comutações que o rectificador realiza por período da corrente de alimentação.

No lado da entrada ou da alimentação por tensão alternada, o rectificador produz harmónicos que

constituem sistemas trifásicos directos ou inversos, quer dizer, com ordens n dadas por

$$n = kp \pm 1 \qquad (8)$$

em que p é a periodicidade do rectificador e k representa qualquer número inteiro igual ou maior que 1.

No lado da saída ou do fornecimento de tensão contínua, as frequências geradas são das ordens

$$n = k\,p \qquad (9)$$

isto é, constituem sistema homopolares.

A periodicidade tem sempre um valor múltiplo de três — são usuais os rectificadores hexa e dodecafásicos e, por vezes, com maior número de fases, sobretudo em instalações de grande potência, tendo em vista a redução de harmónicos.

Em conclusão, pode dizer-se que as correntes harmónicas geradas no lado de alimentação não são, em caso algum, homopolares.

2. *Transmissão de harmónicos* — Tal como na produção, consideraremos separadamente, na transmissão de harmónicos, os sistemas directos e inversos, por um lado, e os sistemas homopolares, por outro.

A propagação dos harmónicos através dos circuitos — tal como a da onda fundamental — é caracterizada pelas grandezas comprimento de onda λ_h, velocidade de transmissão v e frequência f_h, entre as quais há a relação seguinte:

$$\lambda_h = \frac{v}{f_h} \qquad (10)$$

Nos sistemas directos e inversos a velocidade de transmissão nas linhas aéreas tem valores muito próximos da velocidade de propagação da luz, pelo que a expressão (10) toma a forma

$$\lambda_h = \frac{6\,000}{h} \text{ km} \qquad (11)$$

O comprimento de onda correspondente à transmissão em cabos subterrâneos é dado, anàlogamente, pela expressão

$$\lambda_h = \frac{6\,000}{\sqrt{\varepsilon}\,.\,h} \qquad (12)$$

em que se considera a constante dieléctrica ε do isolante do cabo.

O esquema equivalente da linha de transmissão, em T ou em π, permite-nos determinar o regime

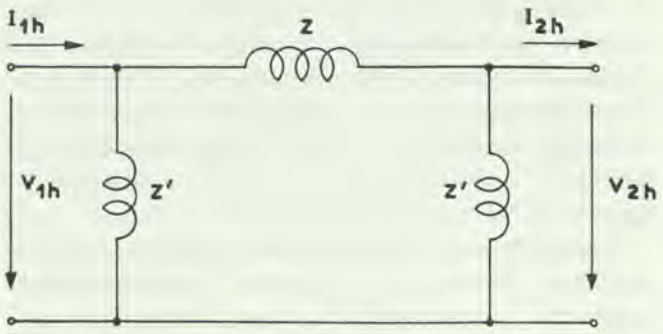

Fig. 3 — Esquema em π da linha de transmissão

das tensões e correntes harmónicas. Na fig. 3 representa-se o esquema em π do quadripolo passivo a que se pode assimilar a linha.

Desprezando, em primeira aproximação, os valores das resistências, Z e Z' são dadas pelas expressões:

$$\bar{Z} = j Z_c\,.\,sen\,\frac{2\,\pi\,L}{\lambda_h}$$
$$\bar{Z}' = -\,j Z_c\,.\,cotg\,\frac{\pi\,L}{\lambda_h} \qquad (13)$$

em que L e Z_c são, respectivamente, o comprimento e a impedância característica da linha.

O estudo da transmissão dos sistemas homopolares torna-se mais complicado em virtude do retorno da onda se fazer pela terra e haver, portanto, que considerar a posição do neutro da rede e dos transformadores em relação a ela.

As expressões do comprimento de onda (11) e (12) deixam de ser válidas, estabelecendo-se, em substituição, expressões semelhantes a partir da velocidade de propagação homopolar que tem o valor aproximado de 180 000 km/seg.

III. O TELECOMANDO CENTRALIZADO A FREQUÊNCIA MUSICAL

1. *EVOLUÇÃO DO TELECOMANDO*

A origem do telecomando centralizado a frequência musical para regularização da curva diária de cargas, remonta à época do aparecimento das primeiras redes de distribuição, com as tentativas empreendidas em fins do século passado, em alguns países — especialmente a França — para o comando a distância de certa aparelhagem.

Porém, só por altura do primeiro quartel deste século se obtiveram os primeiros resultados verdadeiramente interessantes, com a construção dos sistemas Durepaire — Perlat e Actadis.

Essencialmente, qualquer sistema de telecomando é constituído por um posto emissor de sinais a

determinada frequência — frequência de comando — cujas tensões são injectadas nas redes de distribuição, pelas quais se propagam sobrepondo-se às tensões a frequência industrial, e pelo conjunto de receptores que, sob a acção desses sinais promovem a execução das ordens adequadas.

O sistema Durepaire-Perlat, utilizando sinais a frequência muito baixa — 0,8 a 2 Hz — injectados entre o condutor neutro e a terra, com receptores à base de galvanómetros de ressonância de pequeno amortecimento, viu o seu campo de acção restringido a redes de baixa tensão de importância reduzida.

No sistema Actadis — o primeiro a operar com frequências musicais — o emissor é constituído por um alternador trifásico, accionado a velocidade variável, que gera frequências da gama 400 a 1 000 Hz. Cada frequência caracteriza uma ordem de comando e é discriminada pelos receptores, do tipo de ressonância mecânica por lâminas vibrantes, dentre as várias que se lhe apresentam.

A despeito dos inconvenientes que resultam da multiplicidade de frequências, este sistema teve larga expansão já em França — onde estão instalados para cima de 300.000 receptores — já noutros países como a Alemanha e a Inglaterra.

Sem dúvida, a pretensão de se conseguir uma maior simplicidade nos materiais sem qualquer prejuízo para a segurança do funcionamento, orientou a evolução no sentido de uma só frequência para todas as manobras. Assim nasceram os sistemas por frequência única.

O problema da diferenciação das ordens a transmitir (teòricamente tantas quantas as necessárias) que esta nova modalidade havia fatalmente de suscitar, teve a sua solução conveniente no estabelecimento dum código de comando por qualquer dos três modos seguintes, a que correspondem outros tantos processos de telecomando: modulação de amplitude, duração ou intervalos de impulsos.

Nos primeiros, designados vulgarmente por Moduladis, a frequência de suporte entre 400 e 1 000 Hz, sofre tantas modulações, cada uma com o seu ritmo, quantas as ordens a emitir fazendo-se nos receptores uma dupla selecção, a da frequência e a do ritmo de modulação. Foram utilizados em França, isoladamente ou em combinação com o sistema a frequências múltiplas, constituindo o misto Moduladis-Actadis e em Inglaterra, numa variante, com a designação de Rythmatic.

Tanto estes como os sistemas anteriores oferecem uma capacidade de comandos bastante reduzida, à roda de 10 a 12 manobras.

Nos sistemas por duração de impulsos — os fabricados pela casa Brown Boveri C.º — com uma frequência da gama 800-3 000 Hz, é a duração da emissão que caracteriza a ordem. A menos que se recorra ao artifício duma pré-selecção, têm o inconveniente de a duração da emissão aumentar com o número de comandos a enviar.

Nos sistemas por intervalos de impulsos cada ordem é identificada pelo intervalo, de 1 a 100 seg, que decorre entre dois impulsos de curta duração, geralmente à volta de 0,5 seg. emitidos a uma frequência entre 475 e 3 000 Hz. São estes os telecomandos de diversos construtores suíços — Landis & Gyr, Zellweger, Sauter e Ghielmetti — americanos — General Electric C.º e Line Material C.º — e também franceses — sobretudo a Compagnie des Compteurs, onde são designados por Pulsadis.

Tanto os sistemas por duração como por intervalos de impulsos têm tido largo emprego em vários países da Europa.

É no clássico Pulsadis que se filia o recente sistema a 175 Hz — tipo E. D. F., para assim dizer — especialmente concebido pela Electricité de France (em colaboração com a Compagnie des Compteurs) com o fim de generalizar a sua aplicação à totalidade das suas redes, inclusivé àquelas que se encontram cobertas, presentemente, por vários sistemas. Também em outros países se inicia já a sua expansão.

2. *INJECÇÃO NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO*

Qualquer que seja o processo de telecomando que se considere, o posto emissor consta fundamentalmente de três partes distintas: um grupo motor-gerador da frequência musical e seus acessórios; um quadro contendo a aparelhagem necessária ao comando, automático ou manual, do posto e à realização da distribuição dos impulsos de acordo com o código; finalmente, o dispositivo de acopulamento à rede.

A injecção dos sinais na rede de distribuição pode fazer-se, em princípio, na alta, na média ou na baixa tensão.

A. *Injecção nas redes de alta ou média tensão* — São viáveis duas modalidades: em paralelo ou em série, esquematizadas nas figs. 4 e 5, respectivamente.

A primeira utiliza uma célula de acopulamento C_p, formada, em regra, por um conjunto indutância-capacidade sintonizado à frequência musical. O gerador G emite os sinais, cuja tensão é elevada no transformador de adaptação T_a, simultâneamente sobre as impedâncias a montante e jusante, respectivamente Z_m e Z_j, medidas à frequência de comando. O seu emprego é vantajoso quando $Z_m > Z_j$.

A injecção em série realiza-se por intermédio de transformadores semelhantes aos de intensidade,

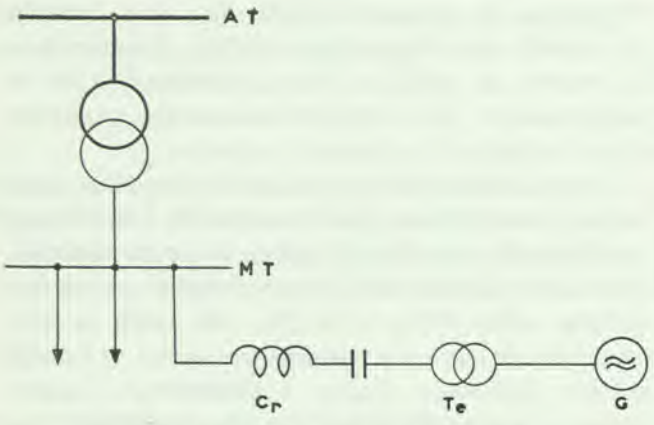

Fig. 4 — Injecção em paralelo em MT

inserindo-se o primário no circuito da rede e ligando-se o secundário ao gerador de frequência audível. Tudo se passa como se este estivesse intercalado entre Z_m e Z_j. Pode utilizar-se sòmente quando $Z_m < Z_j$.

Por via de regra opta-se por esta forma de injecção para frequências que não ultrapassem os 500 Hz; para além deste valor é preferível a injecção em paralelo.

Com valores demasiado pequenos da relação Z_m/Z_j é possível a injecção em paralelo desde que se instale a montante um circuito tampão em ressonância à frequência de comando. Sucede o mesmo sempre que haja que evitar a passagem dos sinais pelas redes a montante — como é, por exemplo, o caso da injecção directa em A. T., fig. 6.

Do mesmo modo, pode fazer-se a injecção em série se não se dispõe de valores de Z_m/Z_j suficientemente pequenos — caso das redes com valores de potência de curto-circuito muito fracos — carecendo-se então de um circuito ressonante que promova o abaixamento de Z_m.

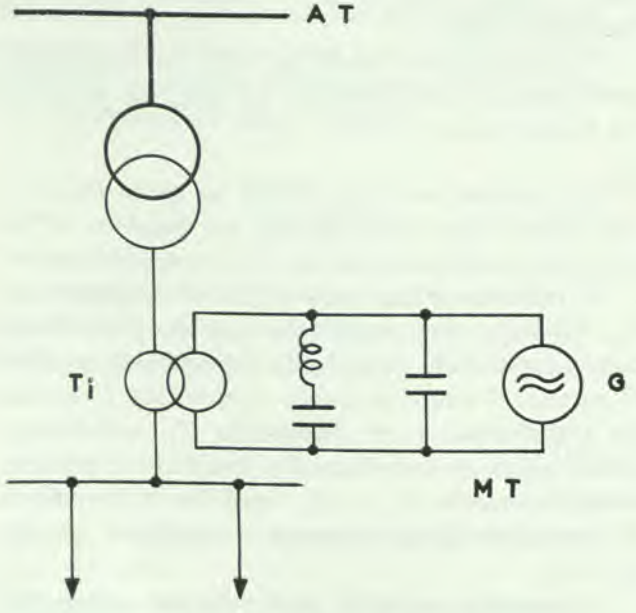

Fig. 5 — Injecção em série em MT

B. *Injecção nas redes de baixa tensão* — Bastante vantajosa no comando de pequenas redes locais, a sua aplicação deve restringir-se, porém, ao caso de um só posto de transformação, a menos que se utilizem fios pilotos de ligação do emissor aos dispositivos de acopulamento nos vários postos.

A injecção, fig. 7, é sempre em série, entre o ponto neutro do transformador e a terra, assim se impedindo a propagação dos sinais na rede de M. T.

Ao contrário do que sucede em A. T. ou M. T., onde se constitui com os sinais um sistema de tensões simétrico, podendo ligar-se os receptores

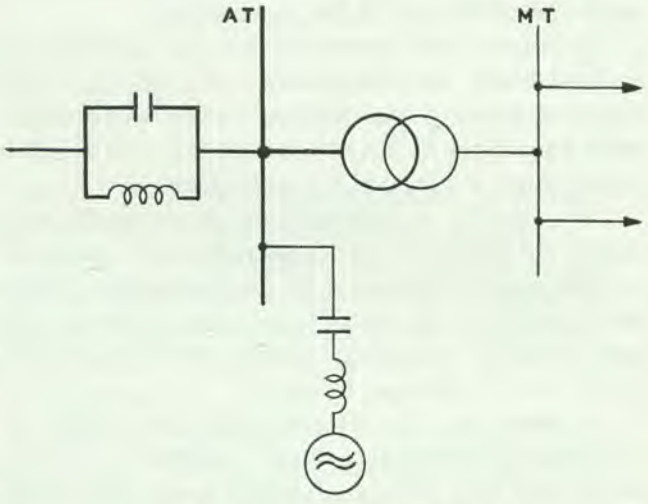

Fig. 6 — Injecção em paralelo em AT

quer entre fases quer entre fase e neutro, na emissão em B. T. o gerador é monofásico obtendo-se um sistema trifásico homopolar, porquanto a tensão é injectada em cada um dos circuitos formados por uma fase e neutro; é, assim, entre estes, exclusivamente, que se deverão ligar os receptores.

3. *ESCOLHA DA FREQUÊNCIA MUSICAL*

Na concepção dum sistema de telecomando é de primordial importância a escolha da frequência audível porquanto o seu valor condiciona, em elevado grau, a segurança de funcionamento dos receptores. Para tanto, requer-se que ela seja imposta pela consideração, não pròpriamente de um ou outro elemento determinante, mas pela do conjunto de factores que, em maior ou menor medida, serão chamados a intervir, tais como: condições de propagação dos sinais,

comportamento dos condensadores e motores de indução ligados à rede, influência de harmónicos da frequência industrial, perturbações sobre os circuitos de telecomunicações e, de certo modo, as próprias dimensões do emissor.

A. *Condições de propagação dos sinais* — Os circuitos de transmissão a M. T. podem considerar-se, com suficiente aproximação, linhas de constantes repartidas funcionando em quarto de onda; os transformadores abaixadores e os circuitos a B. T. como indutâncias em série tendo em derivação a impedância (óhmica e indutiva) da carga de consumidores.

Teòricamente, o alcance do telecomando será dado, em primeira aproximação, pelo comprimento L da linha, isto é, pela equação

$$L = \frac{300.000}{4\,f} \text{ km} \qquad (14)$$

em que f representa a frequência musical escolhida.

Na prática, por razões de ressonância e de configuração bem mais complexa dos circuitos a M. T., não convém exceder 50 e 25 % dos comprimentos calculados pela expressão anterior quando se trata de linhas aéreas ou de cabos subterrâneos, respectivamente.

Supondo, para simplificar, que a linha não tem perdas e representando por $\overline{Z}_o$ a sua impedância característica, por $\overline{Z}_r$ a impedância, à frequência de comando, da carga de consumidores, as equações que regem a transmissão levam à relação

$$\frac{\overline{V}_2}{\overline{V}_1} = -j\,\frac{\overline{Z}_r}{\overline{Z}_o} \qquad (15)$$

entre as tensões de recepção $\overline{V}_2$ e de emissão $\overline{V}_1$.

Variando $\overline{Z}_r$ com o regime de carga da rede, o mesmo acontece com $\overline{V}_2$: esta tensão apresenta, portanto, oscilações no decurso do dia, que, por outro lado, serão tanto maiores quanto mais elevada a frequência.

Também pelo que respeita aos circuitos a B. T. e transformadores, a sua impedância é uma função crescente da frequência, pelo que as quedas de tensão correspondentes o são da mesma forma.

Em resumo, pode, pois, dizer-se que quanto mais elevada a frequência de comando menor é o alcance e maiores as variações da amplitude dos sinais recebidos.

B. *Comportamento dos condensadores e motores de indução ligados à rede* — Para frequências acima de 300 Hz a impedância dos condensadores apresenta valores tão baixos que tudo se passa como se eles se comportassem como verdadeiros curto-circuitos. Surge, assim, um compromisso que só pode ter solução conveniente por uma das duas vias — a protecção de todos os condensadores ou a utilização de uma baixa frequência.

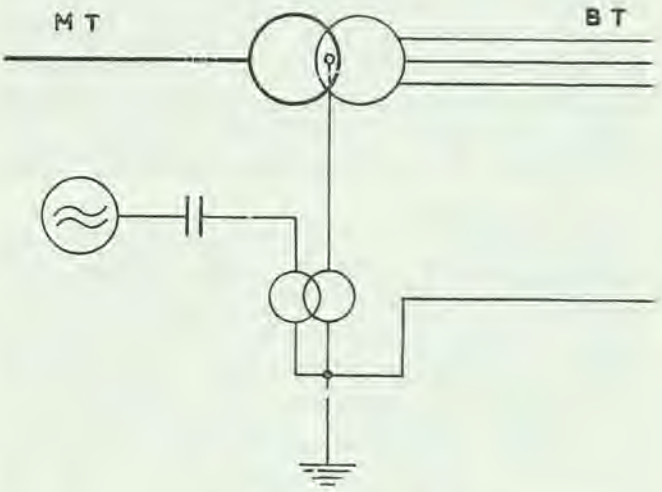

Fig. 7 — Injecção em BT

Nas redes francesas este problema pôs-se com tal acuidade — pois o ritmo anual da instalação de condensadores estáticos anda pelos 300 a 400 MVAr, que, se se não adoptasse, na generalidade, o novo sistema a 175 Hz, haveria lugar a um investimento anual em dispositivos de bloqueio da ordem de grandeza do custo de 30.000 a 40.000 relés receptores.

Idênticamente, a aplicação de condensadores de compensação na iluminação fluorescente não pode fazer-se sem reservas. Se é certo que os esquemas de montagem solo-série e duo se podem empregar com qualquer frequência, porquanto carecem, já por si, de indutância em série com o condensador para uma boa estabilização, o mesmo não se dá com o solo-shunt que implicará a protecção do condensador de compensação.

O comportamento dos motores de indução traduz-se num efeito de certo modo oposto. A sua impedância de fugas é, como se sabe, proporcional à frequência, pelo que se tem

$$Z_f = Z_i \cdot \frac{f}{50} \qquad (16)$$

sendo Z_f e Z_i os valores à frequência f e a 50 Hz, respectivamente. Z_i varia normalmente entre 15 e 30 %, valores referidos à potência e tensão nominais, razão por que não pode diminuir-se f, para além de certo limite, sem prejuízo de aumento da cor-

rente de comando absorvida pelo motor. Para $f = 175$ Hz, Z_f tem, ainda, valores de cerca de 50 a 100 %.

C. *Influência de harmónicos* — Houve já ocasião de ver como os harmónicos se produzem e propagam ao longo dos circuitos de transmissão. Perante os receptores eles comportam-se como frequências de comando bastando para isso que estejam incluídos na sua zona de selectividade. Daqui a necessidade de se impor uma frequência musical afastada, tanto quanto possível, dos harmónicos perigosos.

O critério da sua escolha deve atender às considerações seguintes:

1.º — Revela a observação dos espectros de harmónicos que a amplitude destes decresce, normalmente, à medida que a sua ordem aumenta — assim, é frequente encontrar numa onda de tensão de 220 V o termo de 5.ª ordem com uma amplitude de 5 % da do fundamental e a dos termos seguintes com valores ainda relativamente elevados; não o é, porém, no domínio das frequências de 1 000 Hz ou superiores;

2.º — Sendo constante e igual a 100 Hz o intervalo de dois harmónicos impares consecutivos, a margem de segurança, expressa em percentagem, para uma frequência que se situe a meio do intervalo decresce à medida que se caminha para as ordens superiores. Essa margem, que é de 25 % para 200 Hz, 16,6 % para 300 Hz, etc., toma para 2 000 Hz o valor já muito reduzido de 2,5 %.

Deparam-se, assim, a partir deste ponto da análise, dois caminhos de certo modo antagónicos, na escolha da frequência de comando.

Um conduz a frequências elevadas, da ordem de 1 000 Hz ou superiores, com a consideração das fracas amplitudes de harmónicos nessa região e a segurança de que nenhuma interferência será causada pelos harmónicos predominantes. Implica, no entanto, que o nível da tensão nos receptores seja nitidamente superior ao atingido pelos harmónicos o que pressupõe, desde já, que estes se mantêm sempre fracos na rede, o que não é verdade. Mostra a experiência que a sua amplitude se caracteriza por um elevado grau de irregularidade, quer no espaço quer no tempo, e que o seu desenvolvimento depende, entre outras coisas, do valor da carga, da hora, do dia, do mês, da estação do ano, etc. Por outro lado, os receptores deverão ser dotados dum carácter altamente selectivo, o que é muito difícil de conseguir.

Na segunda via, a escolha recai numa frequência baixa, com a necessária margem de segurança para que os desvios dos harmónicos, produzidos pelas variações da frequência fundamental, não sejam abrangidos na zona de selectividade dos receptores. Aliás, é bem mais fácil, neste caso, conferir a estes suficiente selectividade impondo-lhes um elemento de bloqueio anti-parasitas.

D. *Perturbações sobre os circuitos de telecomunicações* — À semelhança das interferências causadas pelos harmónicos nos circuitos de telecomunicações, as frequências musicais injectadas na rede, podem, também, dar lugar a perturbações, que dependerão da tensão máxima de recepção e da frequência.

As oscilações da tensão, como se viu atrás, crescem com a frequência, pelo que as perturbações serão tanto mais de recear quanto mais elevada for a frequência musical escolhida.

E. *Dimensionamento do emissor* — Dado que a elevação do nível de recepção é, sem dúvida, um dos meios mais eficientes de impedir o efeito das tensões parasitas, quer se trate de harmónicos quer de ondas de outra origem, a emissão a frequências baixas implica o aumento da potência de emissão.

Tratando-se de injecção em paralelo, há a considerar ainda que quanto mais baixa a frequência, maior a capacidade do condensador de acopulamento.

Assim, dum modo geral, o dimensionamento do emissor, e o consequente custo, tornam-se mais elevados no domínio das frequências baixas.

Em conclusão do que se expôs pode dizer-se que os argumentos são, na maioria, favoráveis à escolha duma baixa frequência audível.

4. *RECEPTORES — SELECÇÃO DA FREQUÊNCIA DE COMANDO*

Os relés receptores compõem-se, na sua essência, de dois elementos selectores, o da frequência e o das ordens — o primeiro para a discriminação da frequência de comando entre todas as que se lhe podem apresentar e o segundo para a selecção dos impulsos correspondentes às várias manobras.

Para que o seu funcionamento seja seguro e correcto — as qualidades mais importantes que se lhes pode exigir — devem proporcionar um perfeito sincronismo com o emissor e possuir acentuada robustez aliada a simplicidade de concepção e um elevado grau de selectividade. As duas primeiras condições são, em geral, de mais fácil satisfação do que a última.

Analisemos, sumàriamente, o princípio de funcionamento dos receptores de alguns tipos modernos de telecomando.

A. *Sistema Brown-Boveri & C.º* — O selector de frequência, fig. 8, consta de um circuito oscilante C, L_1 sintonizado à frequência de comando, um autotransformador L_1, L_2, inserto no circuito de grelha dum thyratron V (válvula de cátodo frio)

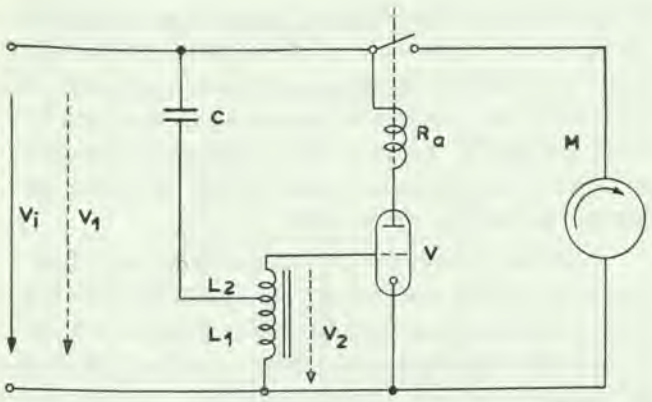

Fig. 8 — Esquema do selector de frequência do sistema BBC & C°

cujo circuito anódico inclui um relé auxiliar R_a que comanda o contacto de alimentação dum pequeno motor síncrono M.

Nos bornes do conjunto está aplicada a tensão de distribuição v_i a que se sobrepõe a tensão à frequência musical v_1.

O material especial de que é feito o circuito magnético de L_1 — ferrox-cube — confere-lhe, a par dum campo de dispersão pràticamente nulo, um elevado valor de agudeza de ressonância.

A válvula V é um tríodo encerrando uma pequena quantidade de gás inerte e com o cátodo em molibdénio. A grelha tem por função iniciar a descarga não podendo impedi-la depois de estabelecida. A regulação daquela só pode ser feita por variação da tensão anódica.

Assim, quando o valor instantâneo da tensão v_2 aplicada à grelha atingir o valor correspondente à descarga — tensão crítica — a válvula escorva, o relé R_a fecha o seu contacto e o motor M inicia a marcha promovendo a actuação do elemento selector de impulsos.

Este é, nas linhas gerais, constituído por um braço selector accionado por M e tendo numa das extremidades uma pequena alavanca basculante que, durante a rotação, passa sucessivamente em frente de 10 interruptores, também basculantes, dispostos circularmente sobre uma platina.

Pela acção conjunta da duração da série de impulsos emitidos e dos movimentos de báscula, serão comandados uns ou outros dos contactos.

Uma emissão compreende 10 sinais de comando e 1 sinal final para que o selector de impulsos retome a posição inicial. A sua duração total é de cerca de 1 minuto.

Um dispositivo de sincronização evita que, em virtude da falta momentânea de tensão, possam ter lugar falsas manobras.

É possível ampliar o número total de ordens até o máximo de 100 por intermédio da pré-selecção, para o que elas são reunidas em grupos de 10, correspondendo a cada grupo um sinal inicial diferente. Os braços selectores que normalmente estão numa posição rebatida, por meio dum encravamento, serão libertados pelo correspondente sinal de pré-selecção. Assim, apenas estarão aptos para a recepção de ordens aqueles que tiverem passado à posição do desencravamento.

As frequências de comando utilizadas encontram-se normalizadas, de acordo com as recomendações da Union des Centrales Suisses, nos quatro valores seguintes: 1050, 1350, 1800 e 2400 Hz.

B. *Sistema Landis & Gyr* — O elemento selector da frequência, fig. 9, é um circuito ressonante série formado pelo condensador C e a bobina do relé R, recebendo directamente os impulsos de frequência audível sem qualquer amplificação prévia.

As variações da capacidade do condensador, por alteração própria ou mudança de temperatura não influenciam o relé que apresenta, para isso, uma curva de ressonância em patamar.

O selector de intervalos de impulsos compreende um pequeno motor síncrono acopulado a um braço selector que, na sua revolução, toca sucessivamente

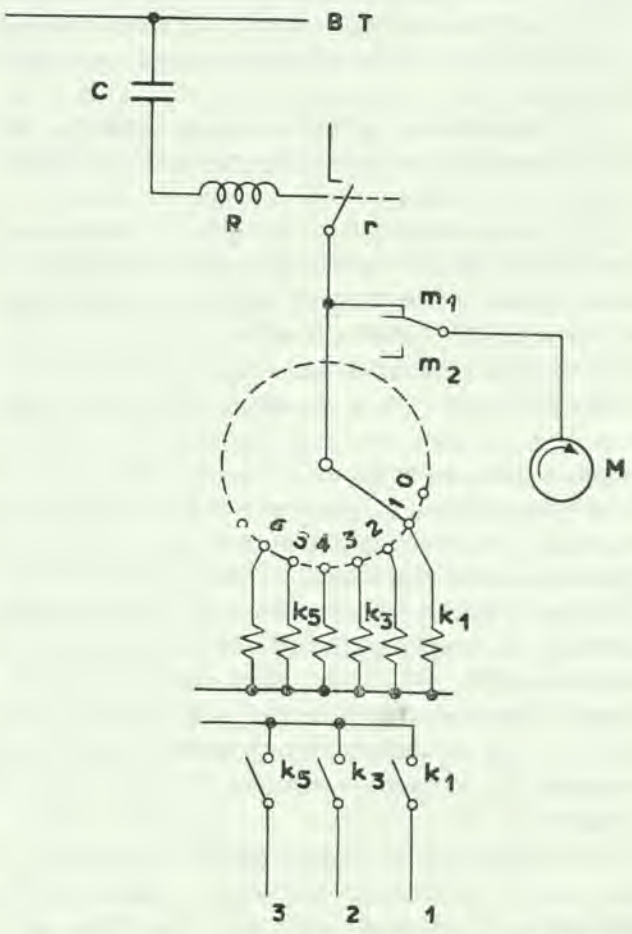

Fig. 9 — Esquema de princípio do receptor L & G

em 50 contactos dispostos na periferia duma platina, aos quais estão ligados os relés inversores com duas bobinas, para as operações de ligar e desligar, em correspondência com os contactos de ordem ímpar e par, respectivamente.

O emissor dispõe dum selector análogo, com comutadores referentes aos diferentes comandos, pelos quais são postos sob tensão os respectivos contactos.

A emissão é iniciada por um impulso de arranque que põe em marcha, sincrònicamente, os motores do emissor e receptores. Estes, logo após o arranque, comutam os contactos m_1/m_2 ficando ligados directamente à rede de B. T. enquanto durar a rotação completa. Os vários impulsos de comando que se sucedem, atingem o circuito ressonante, braço selector, contactos e, finalmente, as bobinas dos relés inversores.

Uma rotação completa do selector dura cerca de 0,5 minutos e dá possibilidade de se efectuarem 50 comandos simples ou 25 duplos; todavia, estes números podem aumentar-se se se recorrer à pré-selecção.

Para fazer face a actuações intempestivas, produzidas sob a acção de tensões parasitas provenientes de manobras ou quaisquer perturbações na rede, fixou-se o limiar de funcionamento num nível de tensão suficientemente elevado, ao mesmo tempo que se conferiu aos selectores um certo atraso no arranque.

As frequências audíveis que se utilizam são normalmente as compreendidas entre 475 e 1000 Hz.

C. *Sistema pulsadis E. D. F.* — O selector de frequência, fig. 10, consta de um circuito eléctrico, uma lâmina vibrante, um mecanismo centrífugo e um dispositivo anti-parasitas.

O circuito eléctrico, que é ligado à rede de distribuição de B. T., é constituído por uma indutância L em série com uma capacidade C, sintonizadas à frequência de comando. A bobina produz a excitação dum ímã permanente sobre o qual está montada uma lâmina vibrante I com ressonância mecânica a 175 Hz, a qual se apoia, por meio duma pequena palheta, sobre uma roda de substância plástica de bordo serrilhado, imprimindo-lhe um movimento de rotação no que é arrastado o mecanismo centrífugo (do tipo de regulador de Watt) que, a uma velocidade determinada, estabelece o circuito do elemento selector de intervalos de impulsos.

O funcionamento intempestivo do selector de frequência encontra-se impedido — tanto quanto necessário do ponto de vista prático — pelo dispositivo anti-parasitas: o mecanismo centrífugo é bloqueado por uma segunda roda dentada montada no seu eixo e com ele solidária, sobre a qual se apoia uma palheta ligada a uma lâmina vibrante II, que entra em ressonância para frequências vizinhas da de comando. A sua acção de bloqueio é completada pela da resistência não linear derivada nos bornes da bobina do selector.

O elemento selector de intervalos de impulsos é formado por um motor síncrono que ataca um eixo sobre o qual se encontram discos dentados em número igual ao de contactos a manobrar e contendo índices, no mínimo de dois, correspondentes às operações de ligar e desligar. Durante a rotação, apresentar-se-á na trajectória descrita por cada índice uma alavanca de comando sempre que haja uma ordem a executar, para o que aquela, por acção dum mecanismo auxiliar, sofrerá prèviamente, uma rotação que a leva da posição de repouso à posição conveniente.

Uma rotação completa do selector tem a duração de 102,5 seg e o número de manobras possíveis é de 40.

Como conclusão do que se expôs, infere-se, como mais essencial, o seguinte:

a) no sistema B. B. C. & C.º é a duração dos impulsos que caracteriza as ordens; pelo contrário, os sistemas Landis & Gyr e E. D. F. servem-se dos intervalos entre impulsos;

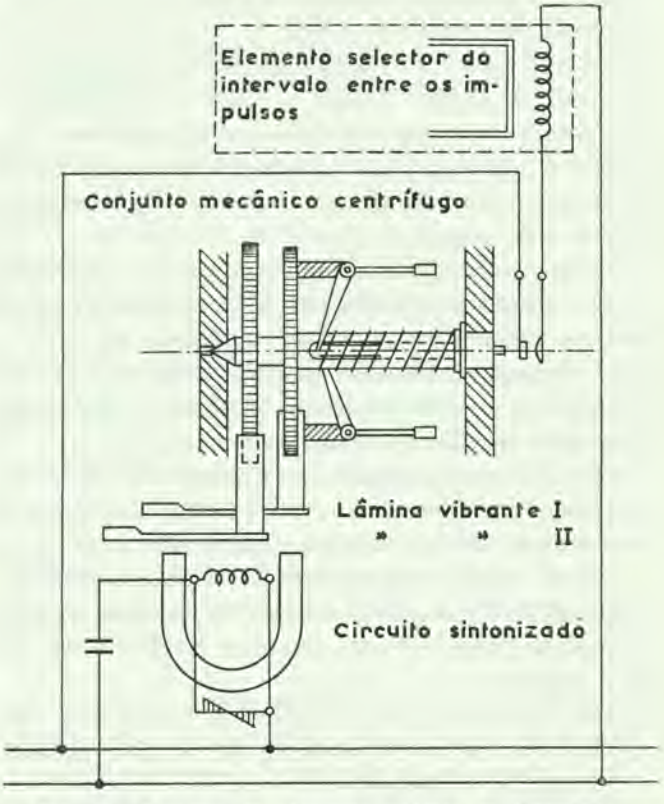

Fig. 10 — Esquema do elemento selector de frequência do sistema EDF

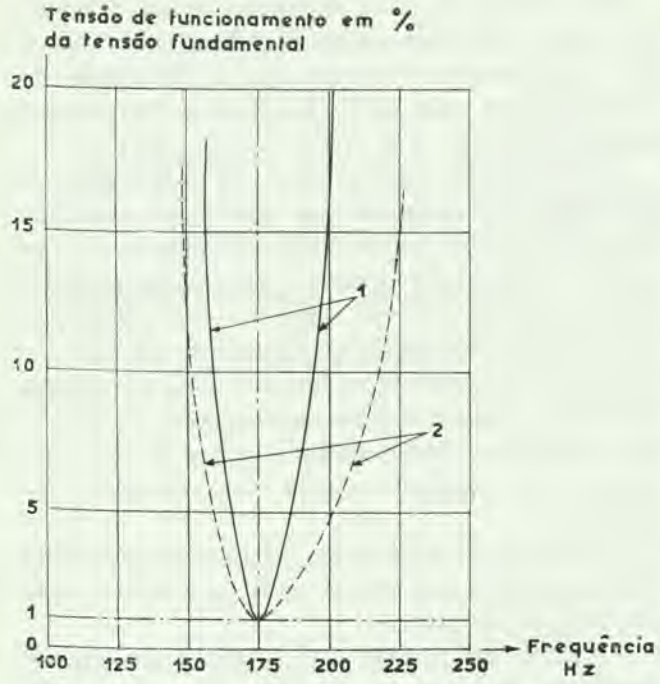

Fig. 11 — 1 — Selector com lâmina vibrante; 2 — Selector com circuito eléctrico

b) nestes dois últimos sistemas há diferenciação entre impulsos de comando e de arranque; no B. B. C. & C.º este efectua-se por comando directo;

c) a selecção, que é puramente eléctrica nos dois primeiros sistemas, tem carácter electromecânico no sistema E. D. F.

É interessante notar que o estudo dos dois processos de selecção neste último sistema conduziu ao resultado de que, comparativamente, os elementos electromecânicos apresentam maior selectividade que os eléctricos, como se depreende da fig. 11, onde se representam as curvas correspondentes. Impõem, por isso, uma regulação mais exacta da frequência de comando com o inconveniente de uma aparelhagem de emissão mais cara, mas em contrapartida, com a vantagem de se poderem instalar, na mesma rede e com o mesmo emissor, receptores de diferente fabrico.

IV. PERTURBAÇÕES NO FUNCIONAMENTO DO TELECOMANDO

Na categoria genérica de perturbações a que pode estar submetido um sistema de telecomando, englobar-se-ão apenas aquelas irregularidades de funcionamento, devidas a causas diversas, que, por levarem à execução de manobras erróneas, se revestem dum carácter da mais alta importância.

Por comodidade podem classificar-se em perturbações gerais e perturbações introduzidas por harmónicos.

1. *PERTURBAÇÕES GERAIS*

A. *Interacção de postos emissores adjacentes* — Numa rede de distribuição, qualquer que seja o sistema de telecomando adoptado, há que prever tantos postos emissores, dimensionados para a carga total a jusante, quantos os pontos de alimentação de que se dispõe. Havendo, como normalmente acontece, interligações a M. T., deverá fazer-se a delimitação das zonas telecomandadas por meio de circuitos tampões nelas inseridos, que definem a carga de cada emissor e reduzem as quedas de tensão à frequência musical. Assim se evitam funcionamentos irregulares dos relés receptores instalados na rede.

É de notar, a este respeito, que aqui mesmo se evidencia uma das vantagens da injecção em série: a barreira está naturalmente assegurada pelos próprios circuitos de acopulamento impondo-se para tal que a emissão seja sucessiva, isto é, que enquanto durar a emissão de um posto todos os demais se encontrem fora de serviço.

B. *Influência da falta de tensão* — A falta momentânea de tensão, no início ou no decurso da emissão, pode gerar falsas manobras se não se dispuser de meios especiais para as evitar.

Na verdade, se após o início da emissão tiver lugar uma interrupção da corrente, os relés receptores podem permanecer numa posição diferente daquela a que corresponderia o comando interrompido. Diz-se, então, que houve uma falsa manobra.

É com este fim que certos construtores utilizam no emissor um dispositivo de sincronização. Mesmo que uma manobra errada tenha sido efectuada, o reaparecimento da tensão promove a emissão dum sinal de sincronização a partir do armário de comando, pelo qual todos os receptores são levados à posição inicial, depois do que se sucede um novo ciclo de ordens.

No sistema E. D. F. confere-se, para o efeito, certa relação à duração dos impulsos e dos seus intervalos. Para isso, consideram-se os tempos de interrupção da tensão por funcionamento dos disjuntores com reengate automático rápido (0,2 a 0,5 seg) — pequenas interrupções — e dos de reengate automático lento (30 a 180 seg) — grandes interrupções. Com base nestes valores estabelece-se o código de comando, fixando-se em:

— 1 seg a duração de cada impulso de comando, superior, portanto, a uma pequena interrupção;

— 1,5 seg a duração dos intervalos entre impulsos de comando;

— 2,75 seg o intervalo do impulso de arranque para o primeiro impulso de comando.

A duração total do ciclo deve ser inferior a uma grande interrupção, pelo que esta não deverá durar menos de dois minutos.

C. *Influência das tensões parasitas* — Entre todos os agentes de perturbação contam-se, como da mais difícil ou impossível previsão — as ondas de tensão parasitas.

As suas causas podem ser as mais diversas: descargas atmosféricas, ondas errantes, fenómenos de escorvamento de arcos em alta, média ou baixa tensão, fusão de corta-circuitos, manobras nas redes, ligação de grandes baterias de condensadores, etc..

Ensaios levados a cabo em diferentes centros de distribuição permitiram concluir que as redes urbanas são, por via de regra, menos sensíveis do que as rurais no que respeita a fenómenos desta natureza; entre as segundas, por razões mal conhecidas, é variável a incidência de parasitas.

A atenção que se dispense à influência das tensões estranhas e consequente probabilidade de falsas manobras não tem um interesse meramente especulativo. Só pela sua consideração se podem ordenar lògicamente as diferentes funções que o telecomando pode executar, de acordo com o grau relativo de segurança que exigem.

2. *PERTURBAÇÕES INTRODUZIDAS POR HARMÓNICOS*

Viu-se anteriormente que os harmónicos da frequência fundamental são susceptíveis de despertar o funcionamento dos receptores se satisfizerem a dupla condição — serem abrangidos pela sua banda de selectividade e apresentarem-se na recepção, com nível suficiente.

A primeira condição é consequência duma qualidade específica do telecomando; a segunda, pelo contrário, se depende deste é, todavia, determinada pela constituição geral e características da rede.

Por outro lado, a irregularidade que acentuadamente caracteriza o desenvolvimento e a propagação das frequências harmónicas aconselha a não generalizar a qualquer rede, sem reserva , os resultados da observação dum espectro-tipo.

Os sistemas de telecomando que utilizam elevadas frequências musicais correm maiores perigos, porquanto se dispõe, muitas vezes, de insuficiente margem de segurança para um e outro lado da frequência de comando. Se os harmónicos mais próximos atingirem então o valor do limiar de funcionamento dos receptores, que, em geral, não é muito elevado, estar-se-á perante um dos casos mais estranhos de actuação extemporânea do sistema.

Foi o que se deu na rede de distribuição dos Serviços Municipalizados de Gás e Electricidade do Porto.

Em Janeiro de 1957 equipou-se uma pequena rede local de iluminação pública, nas Antas, com um posto de telecomando à frequência de 1050 Hz e com cerca de 50 receptores para comando de candeeiros.

Após uma ou duas semanas de funcionamento satisfatório, observou-se que uma causa estranha promovia a actuação dos relés na ausência da frequência musical do gerador. Não havia qualquer possibilidade de controle, uma vez que a qualquer hora do dia eram captadas ordens que ora ligavam ora desligavam os circuitos de iluminação. Receptores retirados do local e ligados noutras redes da cidade, comportaram-se idênticamente, como se uma frequência de comando tivesse sido injectada na rede geral.

Estava-se em face duma frequência harmónica suficientemente importante para prejudicar o funcionamento do sistema.

O início do período das perturbações — princípios de Fevereiro — coincide, de certo modo, com o do aumento do consumo de energia de uma Empresa Fabril equipada com rectificadores de vapor de mercúrio, se se tiverem em consideração os correspondentes índices atinentes aos dois primeiros meses do ano.

No sentido de se conseguir a identificação do harmónico ou harmónicos perturbadores, fez-se, posteriormente, no Laboratório de Medidas Eléctricas da Faculdade de Engenharia, a análise da onda de tensão com o Wave Analyser tipo TF 455 E, da Marconi Instruments Limited, England.

Para maior clareza condensam-se a seguir esses resultados, com referência à gama 0-2000 Hz, em termos do número de ordem do harmónico, sua frequência, valor eficaz da tensão e valor em percentagem do termo fundamental.

Número de ordem	Frequência Hz	Tensão V	%	Número de ordem	Frequência Hz	Tensão V	%
	50	216		17	850	1,8	0,83
3	150	0,2	0,092	19	950	1,6	0,74
4	200	0,05	0,023	21	1050	0,08	0,037
5	250	7,4	3,42	23	1150	2,6	1,2
6	300	0,08	0,037	25	1250	1,4	0,65
7	350	3,6	1,67	27	1350	0,03	0,014
8	400	0,09	0,041	29	1450	0,6	0,28
9	450	0,09	0,041	31	1550	0,4	0,185
10	500	0,08	0,037	33	1650	—	—
11	550	2	0,92	35	1750	0,44	0,204
13	650	3	1,39	37	1850	0,2	0,092
15	750	0,12	0,055	39	1950	—	—

Da observação deste quadro conclui-se que:

a) No domínio de 0-2000 Hz, são os harmónicos de 5.ª, 7.ª, 11.ª, 13.ª, 17.ª, 19.ª, 23.ª e 25.ª ordem os que atingem valor mais elevado;

(Conclui na página 72)