

高次高調波の直列共振に関する研究

高次高調波に対する低圧配電システムの共振現象についての理論解析

Research on the series resonance of high-order harmonics

Theoretical analysis of the high-order harmonics resonances in low-voltage distribution systems

(エネルギー応用研究所 お客さまネットワークG 配電T)

特定の家電機器から発生した商用周波数の40次を超える高調波(以下高次高調波とする)ノイズが低圧配電線において共振し、共振点の機器に過大な電圧が生じ、障害が発生している。そこで、発生する電圧値の最大値について、理論解析を行ったので紹介する。

(Distribution Engineering Team, Customer Supply Network Group, Energy Applications Research and Development Center)

Harmonic noise generated from specific household electrical appliances and over the 40th order harmonics (hereinafter referred to as high-order harmonics) has led to resonance in low-voltage distribution systems. This type of resonance generated an excessive voltage at appliances connected to a resonance point, resulting in failure. Hence this article reports the results of theoretical analysis concerning the maximum value of such voltages.

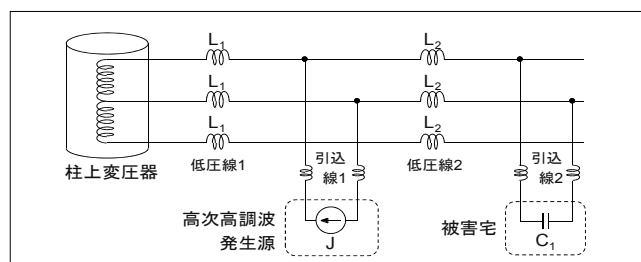
1 背景と目的

漏電等がないのに漏電遮断機が頻繁に動作し、停電する事象が発生した。調査の結果、従来の高調波とは異なる高次高調波により、低圧配電システムが直列共振状態となった場合に生じる過電圧による障害であると判明した。

そこで、この過電圧の最大値について、理論式および近似式により検討を行った。

2 低圧配電システムモデル

一般的な低圧配電システム(100V、200V)の回路を第1図に示す。高次高調波発生源は電流源 J として模擬した。高次高調波ノイズによる障害発生箇所を被害宅とし、被害宅の家電機器電源回路内のコンデンサを C_1 で表している。



第1図 一般的な低圧配電システムの回路図

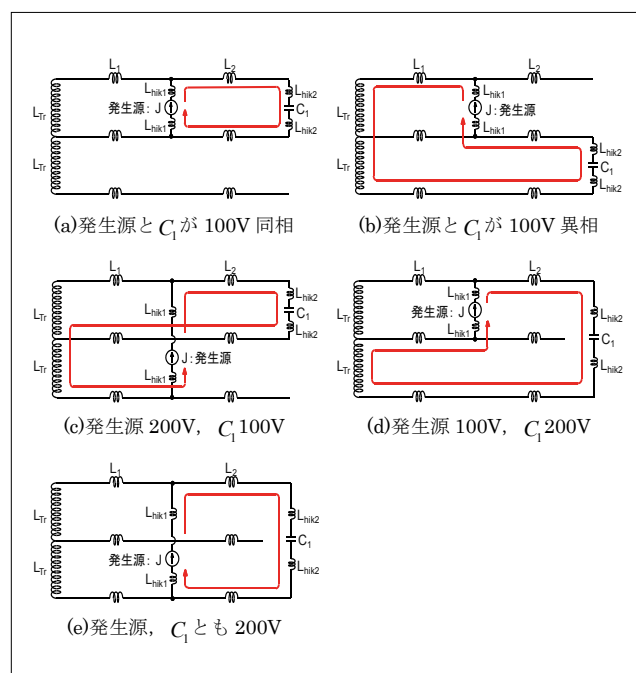
3 直列共振発生条件の整理

3-1 高調波発生源から見た電流のルート

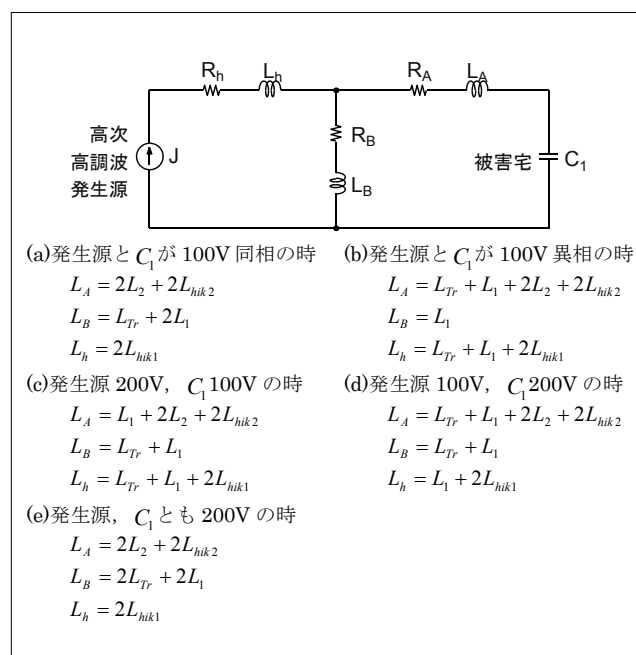
第1図の回路において、高次高調波発生源から流出した電流が被害宅コンデンサ C_1 に流れる際の電流のルートを第2図に示す。

3-2 直列共振発生時の簡略回路

第2図の(a)～(e)はいずれも第3図の回路で表すことができる。なお、次項で導出する理論式および近似式が煩雑になるのを避けるため、柱上変圧器の巻線間の相互誘導による影響は省略した。



第2図 高次高調波電流が C_1 に流入する際の経路



第3図 直列共振発生時の簡略回路

4 直列共振により発生する過電圧の最大値

4-1 直列共振周波数と共振インピーダンス

第3図の回路において抵抗を無視し、高次高調波発生源 J から見たインピーダンスが角周波数 ω で直列共振状態となる C_1 の値を求めると、(1) 式となる。

$$C_1 = \frac{L_h + L_B}{\omega^2 \cdot \{L_h \cdot (L_A + L_B) + L_A L_B\}} \quad (1)$$

また、直列共振時に第3図の C_1 両端に発生する電圧を求めると、(2) 式となる。

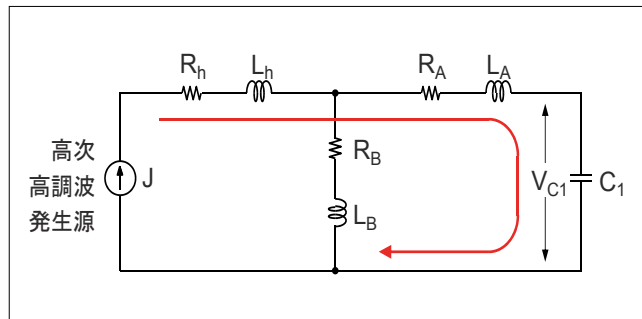
$$V_{C1} = \frac{Z_1}{1 - \omega^2 L_A C_1 + j\omega C_1 R_A} \cdot J \quad (2)$$

但し、

$$Z_1 = \frac{R_B - \omega^2 C_1 (R_A L_B + R_B L_A) + j\omega (R_A R_B C_1 - \omega^2 L_A L_B C_1 + L_B)}{1 - \omega^2 C_1 (L_A + L_B) + j\omega C_1 (R_A + R_B)} \quad (3)$$

4-2 直列共振インピーダンスの近似式

第3図の回路において、直列共振時には L_h 、 L_A 、 C_1 の合計インピーダンスはほぼゼロとなる。よって、発生源から流出した高調波電流の大半が第4図のように C_1 に流入することになる。



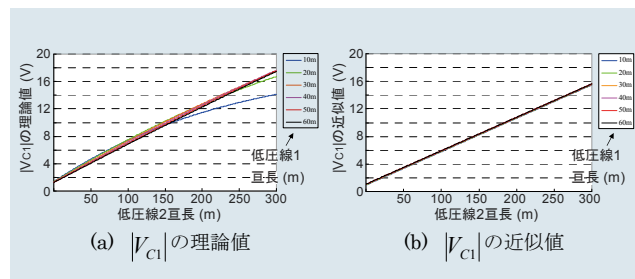
第4図 直列共振発生時の簡略回路における電流の経路

発生源から流出した高調波電流の大半が C_1 に流入するため、被害宅電圧 V_{C1} は近似的に次式で表される。

$$V_{C1} \cong \frac{1}{j\omega C_1} \cdot J \quad (4)$$

4-3 近似式の妥当性確認

上記 (4) 式の妥当性を確認するため、(1)、(2)、(3) 式により求めた V_{C1} の理論値と (4) 式により求めた V_{C1} の近似値を比較する。一般的な配電システムの構成を考慮し、第1図の低圧線1を10～60m、低圧線2を0～300mの範囲で変化させ、 C_1 を(1)式の値に設定したときに、被害宅 C_1 に生じる高次高調波電圧を第5図に示す。第5図より、(4) 式は理論式から求めた結果と同様の傾向を示していることが確認できる。



第5図 被害宅 C_1 に生じる高次高調波電圧

4-4 直列共振時に過電圧が最大となる条件

直列共振時の被害宅電圧の近似式である (4) 式に (1) 式を代入すると、(5) 式が得られ、その大きさとして (6) 式が得られる。

$$V_{C1} \cong -j \cdot \frac{\omega \cdot \{L_h \cdot (L_A + L_B) + L_A L_B\}}{L_h + L_B} \cdot J \quad (5)$$

$$|V_{C1}| \cong \omega \cdot \left(L_A + \frac{L_h L_B}{L_h + L_B} \right) \cdot J \quad (6)$$

下記 (7)、(8) 式より、(6) 式の右辺第2項は 0 から L_h の範囲で変化し、第3図より、 L_h は L_1 に比例して大きくなる。なお、 L_h は L_{Tr} および L_{hik1} にも比例するが、これらの値は柱上変圧器のもれインピーダンスおよび引込線インピーダンスであり、ほぼ一定の値に制限される。

$$\lim_{L_B \rightarrow 0} \left(\frac{L_h L_B}{L_h + L_B} \right) = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{L_B \rightarrow \infty} \left(\frac{L_h L_B}{L_h + L_B} \right) = L_h \quad (8)$$

(6) 式右辺第1項の L_A も L_1 および L_2 に比例して大きくなる。以上のことより、柱上変圧器から高次高調波発生源の距離が長く、また高次高調波発生源から被害宅の距離が長いほど、(6) 式の値は大きくなり、被害宅に大きな高次高調波電圧が発生することが分かる。なお、近似式 (4) では抵抗分を無視しているため V_{C1} の大きさは無限大になり得るが、実際には直列共振時の抵抗分により被害宅に発生する高次高調波電圧 $|V_{C1}|$ はある一定の範囲に制限される。

5 まとめ

高次高調波に対して低圧配電システムが直列共振状態となり発生する過電圧の最大値について検討を行い、柱上変圧器から高次高調波発生源の距離が長く、また高次高調波発生源から被害宅の距離が長いほど、直列共振発生時に被害宅に大きな高次高調波電圧が発生することを示した。

今後は、並列共振回路の理論解析を行い、高次高調波の配電システム内での共振条件の定量化を図り、今後の対策の一助としていく予定である。



執筆者／國井康幸