



瞬時電圧低下(瞬低)の 影響を解析するための理論と課題

2013年10月24日

旭化成エンジニアリング(株) 加戸 良英



報告の前提

当報告は、石油コンビナートや大規模化学工場のように大型電動機設備を多く抱えるプラントを対象とします。これらには下記特徴があります。

1. 大電力を消費し負荷の誘導電動機比率が高い。UPSは計装負荷や制御電源系及び一部の非常用電源をバックアップするのみである。瞬低対策(補償)装置で補償できる負荷は全体から見ると僅かである。
2. 生産設備は連続プロセス主体であって、ライン制御系設備等とは異なり、瞬低による駆動機の僅かな回転数・トルク変化の影響は回避できる場合がある。
3. 一方で、一旦プラントが停止すると再立ち上げに多大な時間を要し(数日~数週間)、また機会損失は甚大であることが多い。(コンビナートでは数億~数十億 ¥/回)



瞬低解析における近年の課題

No.	項目	検討すべき事項	備考
1	交直変換装置を使用した分散型電源の普及(再生可能エネルギー発電等)	①分散型電源の瞬低時FRT要件とリスタート特性を考慮すべき(注1) ②FRT性能は交直変換装置の制御性の優劣により製品に差異が存在する(注2)	Sheet10 資料5項
2	瞬低補償(対策)装置の普及(高・低圧レベル)	不平衡な瞬低、並びに電圧波形ひずみの影響で動作不具合の例あり(注2)	Sheet9 資料5
3	電動機制御装置(高・低圧MCC)の電子化	電磁接触器(コンタクト)釈放と再開路電圧は電子式制御装置によって均一化される(例・・・釈放:70%前後、再開路:80%前後)	
4	可変速ドライブの増加	①瞬低に対する運転継続性能とリスタート特性を考慮すべき	

注1) FRT (Fault Ride-Through) : 系統事故時の運転継続性能。「系統連係規程JEAC 9701-2012」による。

注2) 交直変換装置の位相検出性能等、制御性の優劣が存在する。



瞬低対策検討の一般課題(その1)

No.	項目	検討すべき事項	備考
1	連続プロセスでは圧力・流量変動、反応や燃焼の乱れからプラント停止に至る場合がある	①電動機に瞬低対策を施しても回転数変化は避けられず圧力・流量変化は必ず発生する。 ②プロセス上許容される範囲で圧力・流量等のインターロックに遅延タイマを挿入する方法がある。(順次再開路方式の場合は特に) ③瞬低時の圧力・流量変動を抑制するためアキュムレータやバッファレシーバーを設ける方法がある。	資料3項
2	再開路方式にて瞬低時の電磁接触器OFF信号は適切に処理する必要がある	①電動機に再開路方式の瞬低対策がとられている場合、瞬低で外部に電磁接触器OFF信号が出力される。 ②電磁接触器OFF信号は不用意にインターロックに使用しない。 ③電磁接触器OFF信号でインターロックを構築する場合は信号の受け側に適切な遅延タイマを挿入する方法がある。	



瞬低対策検討の一般課題(その2)

旭化成エンジニアリング AEC

No.	項目	検討すべき事項	備考
3	負荷フィーダ過電流保護への配慮	①電動機側で「ラッチ式」電磁接触器採用、「遅延釈放方式」等の方法で瞬低対策をとった場合も、電圧回復後、電動機群が一斉に再加速する大電流でフィーダの過電流保護継電器が不要動作する場合がある。 ②保護協調では瞬低時の現象も配慮する必要がある。	資料3項
4	電圧回復遅れ、回復不能	①上記と同様、継続時間が長い瞬低の場合は、電動機側で対策が取られた場合も末端系統の電圧回復に問題が生ずる場合がある。 ②対策電動機を必要最小限に絞り込むことも一つの方法である。	資料3項
5	自家発電設備及び系統連係保護装置との協調	①瞬低で系統連係保護が動作し不要な解列(Island運転)に至らないよう配慮が必要。 ②同じく、自家発電設備の安定運転が阻害されないよう配慮が必要。	

Copyright© Asahi Kasei Engineering Corporation. All Rights Reserved.

AsahiKASEI



瞬低対策検討の一般課題(その3)

旭化成エンジニアリング AEC

No.	項目	検討すべき事項	備考
6	ガスタービン発電設備のシェアピン破断	①近傍の短絡でタービン・発電機の軸系に過大なトルクが作用し保護用シェアピンが破断する現象が報告されている。 ②破断を回避するためには (a)機械軸系のねじり共振問題 (b)短絡現象の限流効果等を総合的に検討する必要がある。	
7	同期電動機の脱調(step out)	①継続時間が長く電圧陥没が深い瞬低の場合は脱調が避けられない。(電圧陥没が深い場合、概ね0.2秒以上ではリスクが高い) ②脱調現象は過電流リレーで保護することは困難、インピーダンス形リレーで検出する。	

Copyright© Asahi Kasei Engineering Corporation. All Rights Reserved.

AsahiKASEI



誘導電動機負荷に対する解析の課題(その1)

旭化成エンジニアリング AEC

No.	項目	検討すべき事項	備考
1	負荷モデルの適切な選択	①電動機比率が高いプラント負荷にあっては「動的負荷モデル」として「誘導機モデル」又は「同期機モデル」を使用すべき。 ②プラントでは「静的負荷モデル」は適さない。	Sheet11
2	誘導電動機モデルの適切な選択	①固定子と回転子の電磁力と力学系を統合した「詳細モデル」を使用することが望ましい。 ②すべりによって回転子定数(二次抵抗とリアクタンス)が変化することを模擬したモデルを使用することが望ましい。	Sheet12 Sheet13 資料2項
4	電動機負荷の慣性定数とトルク特性の精度	ポンプ、ファン、押出機、他、負荷の種類で慣性定数と速度-トルク特性が異なるのでより正確な値を把握する。	Sheet12 Sheet15

Copyright© Asahi Kasei Engineering Corporation. All Rights Reserved.

AsahiKASEI



誘導電動機負荷に対する解析の課題(その2)

旭化成エンジニアリング AEC

No.	項目	検討すべき事項	備考
5	電磁接触器の特性把握と解析への反映	①電圧低下時の釈放電圧、回復時の再投入電圧を把握する。 ②電子式制御装置採用の場合も電磁接触器の応動を解析に反映する。	
6	電動機の定数反映と縮約	①大型電動機は1台毎に定数と諸特性を反映することが望ましい ②一方で、負荷に多数の電動機が存在する場合は適切な縮約(reduction)を行う必要がある	Sheet14
7	誘導電動機の残留電圧問題	電磁接触器が一旦釈放し再投入する際、突入電流と過渡トルクで過電流発生、機械的破損が生じる場合がある。	Sheet16 資料4項
8	電源側で不平衡な短絡現象となった場合の電動機欠相保護動作	①電圧不平衡で電動機電流も不平衡となり欠相(不平衡)保護が不要動作する事例あり。 ②適切な遅延タイムの挿入を検討要。	

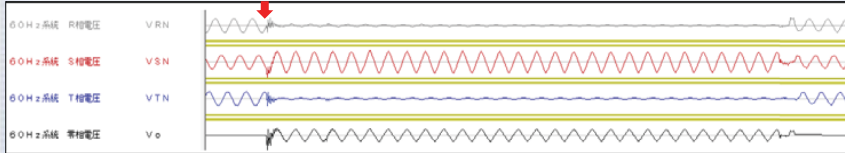
Copyright© Asahi Kasei Engineering Corporation. All Rights Reserved.

AsahiKASEI

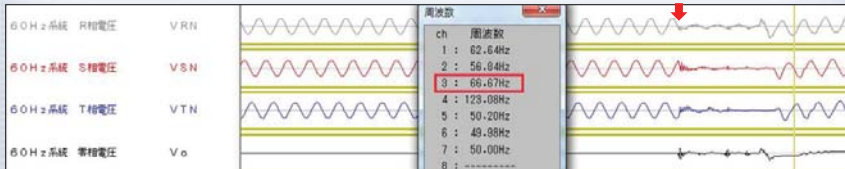


瞬低電圧波形の実測例

2012年8月 九州地区における瞬低電圧波形(66kV系)



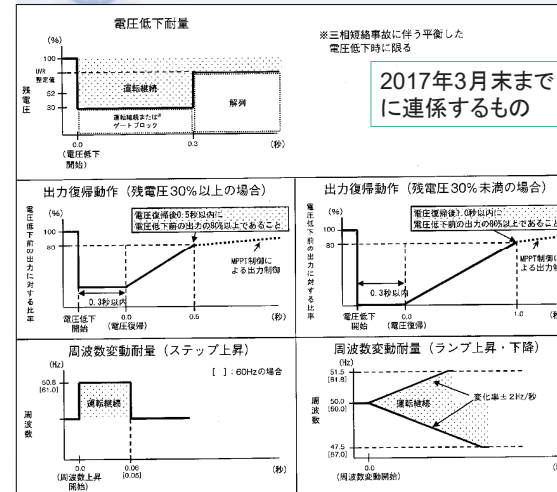
2013年7月 九州地区における瞬低電圧波形(66kV系)



- 瞬低は不平衡である場合が多く三相がバランスしていることは稀である。
- 回路の共振により発生瞬時には高調波成分が重畳することが多い。



分散電源に求められるFRT要件とPLL



2017年3月末までに
に連携するもの

「系統連係規程JEAC 9701-2012」より。

FRT要件を実現するためには ①制御系の高速化 ②電源電圧位相の正確な把握 が不可欠である。

交直変換装置は位相検出方式(PLL: Phase Locked Loop)の精度によっては、不平衡と高調波に対し脆弱な場合がある。



静的負荷モデルの例(その1)

【国内における習慣(悪しき習慣)】

電力会社の大電力系統における解析では、負荷群に対し下記のような「静的負荷モデル」を適用する例が多い。ただし、電動機負荷が多いプラントの系統では適切な方法とはいえない。(ETAPではLumped LoadのExponential 負荷に相当)

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{pf} \Delta f) \quad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + K_{qf} \Delta f) \quad P: \text{有効電力} \quad Q: \text{無効電力}$$

添字 0 は初期値を表す

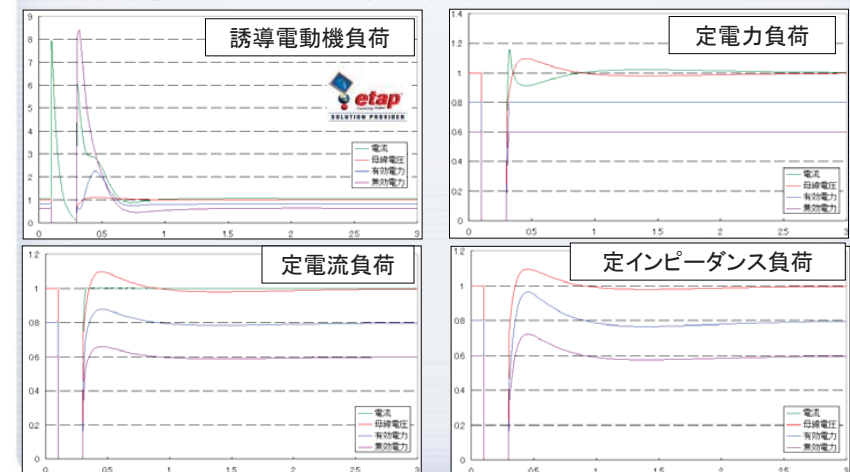
有効・無効電力は電圧と周波数の関数として表現される。
 $\alpha=0$: 定電力負荷 $\alpha=1$: 定電流負荷 $\alpha=2$: 定インピーダンス負荷

このモデルは、電圧が大きく変動した場合の誘導電動機負荷のすべり増加、電圧回復の際の再加速等、慣性系(力学系)の効果を含む動的(ダイナミック)な効果は表現できない。また、電磁接触器の開路(釈放)や再閉路(再投入)等、状態の時間変化を模擬することは不可能である。



静的負荷モデルの例(その2)

電源で短絡が発生した場合の負荷の応動比較。





誘導電動機の精密モデル(その1)

直接法(三相モデル)の例

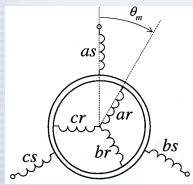
固定子と回転子の電圧方程式(添字 s は固定子、r は回転子を表す)

$$[v_{abc,s}] = [R_s][i_{abc,s}] + [L_s] \frac{d}{dt} [i_{abc,s}] + [M_{sr}] \frac{d}{dt} [i_{abc,r}]$$

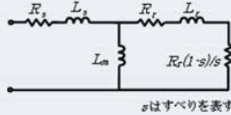
$$[v_{abc,r}] = [R_r][i_{abc,r}] + [L_r] \frac{d}{dt} [i_{abc,r}] + [M_{sr}]^T \frac{d}{dt} [i_{abc,s}]$$

電機トルク: 空隙の電磁力 (P_F は極対数)

$$T_{em} = P_F [i_{abc,s}]^T \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][i_{abc,r}]$$



固定子巻線と回転子巻線の位置関係

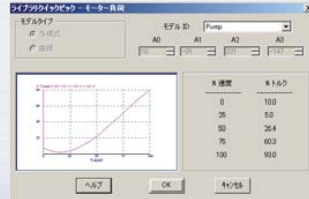


回転体の運動方程式

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em(\omega)} - T_l(\omega)$$

J : 回転体の慣性モーメント
T_l : 負荷機械の反抗トルク

ETAPに装備されたPumpの速度-トルク特性



誘導電動機の精密モデル(その2)

回転子は、すべり周波数変化による表皮効果と深溝効果で、すべりによって定数そのものが変化する。(左図)

ETAPでは、①回転子定数がすべりの変化とともに直線的に変化するモデル: Single2: 1重かご形2) ②回転子回路を二本として模擬する方法: (DBL1: 2重かご形1、DBL2: 2重かご形2→右図) が準備されており、精度アップのためにはこれらを使用することが望ましい。

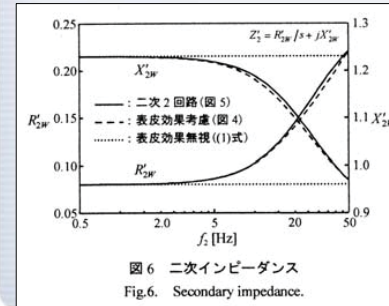


図6 二次インピーダンス Fig.6. Secondary impedance.

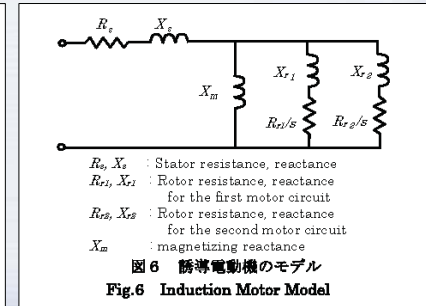


図6 誘導電動機のモデル Fig.6 Induction Motor Model



誘導電動機負荷の縮約(reduction)

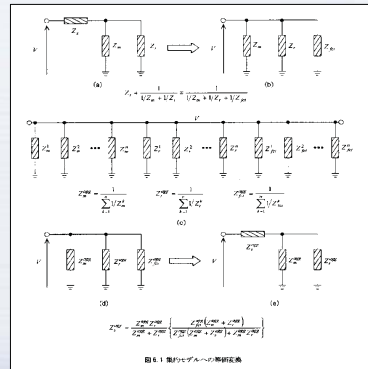
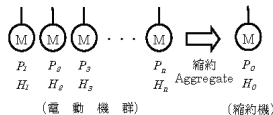
多数の誘導電動機負荷が存在するプラントでは、①ソフトウェアの能力 ②作業効率の面から縮約を行う場合がある。(例)水島地区旭化成の誘導電動機台数: 約6,000台 (パッカー、パレタイザ、他自動化機械を除く)

代表的な二つの縮約方法を示す。

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n \quad (1)$$

$$H_0 = \frac{H_1 P_1 + H_2 P_2 + H_3 P_3 + \dots + H_n P_n}{P_0} \quad (2)$$

ただし、
P₁...P_n : 電動機群それぞれの容量(kVA)
H₁...H_n : 電動機群それぞれの単位慣性定数(kW・sec / kVA)
P₀ : 縮約機の容量(kVA)
H₀ : 縮約機の単位慣性定数(kW・sec / kVA)



誘導電動機と負荷の単位慣性定数(H)

負荷機械と電動機、カップリング等、回転体の慣性をただしく把握することが解析の精度アップに繋がる。実機データから計算した例を下表に示す。これより、代表値として 遠心ポンプ類: 0.4 , ファン類: 6.0 を使用する場合がある。

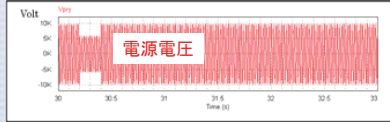
表4 代表的な単位慣性定数(H) Table 4. Representative Inertia constant (H)

Load	Motor Rated Output (kW)	Motor Rated Speed (r.p.m)	Motor + Load J (kg-m ²)	Inertia constant H (kW-sec / kVA)
Cooling water Pump (Sea water)	1,100	505	307.5	0.36
Centrifugal Pump (General)	100	1,750	2.5	0.37
Turbine Pump (Boiler BFP)	420	3,565	10.3	1.57
Length multi-gear Pump	125	1,750	2.8	0.35
Turbo Fan (Boiler FDF)	280	1,750	93.0	5.13
Turbo Fan (Boiler FDF)	280	1,750	94.3	5.20
Recip. Comp.	120	585	100.0	1.44
Screw Gas Comp. (60Hz machine)	850	873	1,437.5	6.50

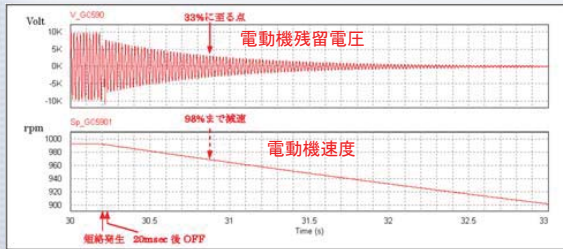


誘導電動機の残留電圧

電磁接触器の「再閉路方式」を採用する場合、誘導電動機の残留電圧と電源電圧の位相ずれによって、突入電流に加え大きな過渡トルクが発生し、最悪の場合は軸系やカップリング破損等の機械的損傷が生ずる恐れがある。



残留電圧の解析例 : 電源電圧が60% (残留) まで低下する瞬低



NEMAでは残留電圧が33%以下の場合、再閉路の際に機械的に耐えることが要求される。

⇒この検討結果を受けて、高圧電磁接触器を「再閉路方式」から「閉路維持」に改造した事例がある。